Ferdowsi Civil Engineering, 36, 4, 2024. (45-70)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Seismic Evaluation of Multi-Span Reinforced Concrete Bridges with Ultra-High-Performance Concrete Piers Using Fragility Curves

Research Article

Hamed Ghadimi Moghaddam[1], Fereshteh Emami[2], Mohammad Reza Mansoori[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.84877.1261

1- Introduction

Bridges are important and vital structures that facilitate traffic at non-level intersections and reduce traffic in transportation networks. These important structures have a lower redundancy compared to buildings, resulting in a higher probability of damage in these structures than residential buildings. Therefore, scientists in the past two decades have focused on the design, evaluation, and utilization of materials with advanced specifications in the field of civil engineering. One of these emerging materials is ultra-high-performance concrete (UHPC) which, in addition to its fine and homogeneous granulation structure, has advanced mechanical characteristics, such as high compressive and tensile strengths. Consequently, it has become one of the efficient materials in the construction of concrete bridges, especially in the discussion of deck repair, pier construction and repair, and cast-in-place connection elements. There are various methods to evaluate Bridges. one of the most accurate methods is incremental dynamic analysis (IDA). This analysis is performed using a set of time history analysis (THA), allowing the structure to be checked under the effect of real earthquake records at each step to reach the collapse point. Finally, fragility curves are drawn using IDA curves and using statistical and probabilistic methods, such as normal distribution function and cumulative distribution function, and statistical parameters, including mean and standard deviation. These curves illustrate the probability of damage occurrence in the structure based on predefined performance levels and states. This study aims to evaluate the probability of damage and performance differences in concrete BRIDGES with UHPC piers considering the impact of far-field and near-field earthquake records. The assessment will specifically focus on bridges with piers heights of 5 and 8 meters and compare its performance difference with conventional concrete, such as C25 concrete, under the same conditions.

2- Materials

The use of UHPC in all components of a bridge is not economically justified due to its high construction cost. Therefore, conventional concrete (C25) has been utilized in the construction and modeling of the bridge deck, with only the bridge piers incorporating UHPC. This allows comparing the performance of piers made with this UHPC with those made with conventional concrete. The specifications of UHPC and conventional concrete are presented in Table 1.

Table 1. Specifications of conventional concrete (C25) and UHPC

Modulus of Elasticity (Ton/m^2)	Poisson's Ratio (U)	(MPa)Tensile Strength	Compressive Strength (MPa)	Concrete type
2400000	0.2	3	25	Conventional Concrete (C25)
4743609	0.18	10	177.75	UHPC

3-Modeling

The bridges modeled in this paper are three-span continuous concrete bridges with a span length of 20 m, a total length of 60 m, and a width of 9.2 m, which provides the possibility of creating a traffic lane in each direction. This bridge configuration allows for the establishment of a traffic lane in both directions. The presented bridge prototype features three-column supports that act as

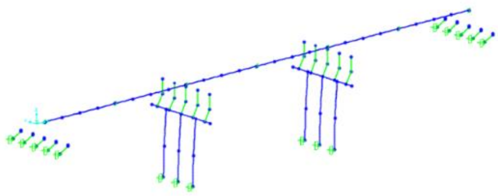
*Manuscript received October 18, 2023, Revised, January 16, 2024, Accepted, March 18, 2024.

[1] MSc Student of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

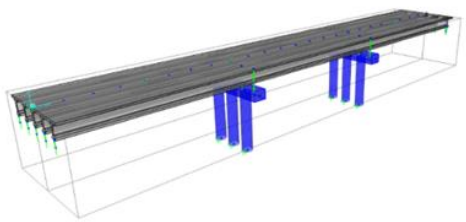
[2] Corresponding author. Assisstant Professor of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. **Email:**f-emami@srbiau.ac.ir.

[3] Assisstant Professor of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

transverse frames and are isolated from the deck using elastomeric bearings. The model is developed in the CSI-Bridge software, utilizing the frame element approach. In addition, the utilization of elastomeric bearings allows for realistic representation of the bridge's response to dynamic loads. The CSI-Bridge software provides a comprehensive platform for modeling and analyzing bridges, making it well-suited for the detailed investigation of the bridge's performance under various loading conditions. The details of the modeled bridge in the CSI-Bridge software based on the frame element are shown in Figure 1.



(a)



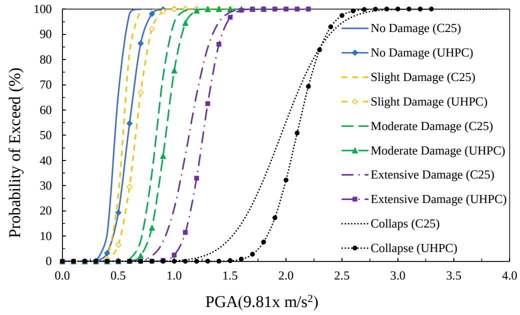
(b)

Fig. 1. Modeled bridge in the CSI-Bridge software in both: (a) simple and (b) extruded configurations

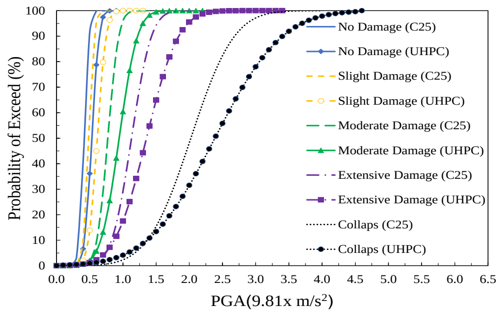
4-IDA Analysis

In the IDA, a total of seven far-field and seven near-field earthquake records were used based on ATC-63. The seismic parameter used in this study was the maximum ground acceleration and the engineering demand parameter of the relative displacement of the bridge piers. The horizontal components of the bridge were applied in the longitudinal and transverse direction of the bridge. The relative displacement in the longitudinal direction was considered the main criterion in all models due to the very small relative displacement in the transverse direction compared to the longitudinal direction of the bridge.

Finally, by conducting a series of THA with incremental steps of 0.1, IDA curves for each bridge sample categorized by seismic fields were obtained. With using probabilistic tools, the normal distribution function and cumulative distribution function and statistical parameters, such as mean and standard deviation, the fragility curves based on damage states defined in HAZUS were derived. Figure 2 shows the results obtained from the fragility curves of bridge that have 5 m piers height, with piers made of UHPC and conventional concrete under the effect of earthquakes in both far-field and near-field zones.



(a)



(b)

Fig. 2. Fragility curves of modeled bridges with 5 m pier height under the effect of :(a) far-field and (b) near-field earthquake records

5-Conclusion

The results obtained from the analysis of fragility curves indicate that UHPC, based on its homogeneous structure and advanced mechanical properties, provides high compressive strength. Through the creation of proper confinement, UHPC not only enhances the elastic region's capacity but also increases the base capacity in the plastic region by introducing greater hardening and reinvigorating the piers capacity. Consequently, the possibility of damage occurrence in UHPC-based bridges is lower across all defined performance levels compared to bridges with conventional concrete piers. This demonstrates the substantial impact of UHPC in improving the resistance and stability of structures, achieving a minimum of 7.14% and a maximum of 26.09% improvement in the ultimate damage and collapse levels, compared to ordinary concrete.

This significant improvement in structural behavior and the increased potential of constructed elements suggest that UHPC can be effectively utilized for reducing cross-sections, optimizing designs, and achieving more aesthetically pleasing architectural configurations.

مهندسی عمران فردوسی، ۳۷، ۱، ۱۴۰۳. (۴۵-۷۰)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

ارزیابی لرزه‌ای پل‌های بتنی چند دهانه با پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند با استفاده از منحنی شکنندگی*

مقاله پژوهشی

حامد قدیمی مقدم[۱] فرشته امامی[۲] محمدرضا منصوری[۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.84877.1261

چکیده *پل‌ها نقش حیاتی در اتصال مسیرهای حمل و نقل، مدیریت ترافیک، و دسترسی به مکان‌های استراتژیک نظامی، سیاسی و اجتماعی ایفا می‌کنند که اهمیت آن‌ها به‌ویژه در زمان بحران آشکار می‌شود. زمین‌لرزه‌ها جزو حوادث غیر قابل پیش‌بینی هستند که عملکرد شریان‌های حیاتی حمل و نقل را مختل می‌کنند و منجر به تخریب این سازه‌های مهم می‌شوند. استفاده از فناوری‌های نوآورانه، مانند بتن فوق توانمند، به‌عنوان یک راه امیدوارکننده برای افزایش انعطاف‌پذیری سازه و کاهش آسیب مطرح می‌شود. این بتن به واسطه طرح اختلاطی که دارد دارای ساختاری یکپارچه و همگن، نفوذپذیری پایین و دوام بالا است که می‌تواند موجب افزایش ظرفیت مقاومت پل در برابر نیروهای لرزه‌ای و محدودکردن انتشار آسیب شود. یکی از مؤثرترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها، تحلیل شکنندگی است، روشی که با استفاده از شاخص‌های آسیب، سطوح آسیب را تحت اثر پارامترهای لرزه‌ای بیان می‌کند. این مطالعه عملکرد لرزه‌ای پل‌های شهری با سیستم تیر- دال بتنی با پایه‌هایی ساخته شده از بتن فوق توانمند با ارتفاع ۵ و ۸ متر را ارزیابی می‌کند؛ که تجزیه و تحلیل آن با استفاده از نرم‌افزار CSI Bridge انجام شده و شتاب‌نگاشت‌های مناسبی از حوزه دور و نزدیک جهت تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) و محاسبه سطوح خسارت انتخاب گردید؛ نتایج بیان می‌کند احتمال فراگذشت آسیب در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند نسبت به پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی کمتر است. با بررسی سطوح شدت در میانه خسارت مشاهده می‌گردد که ظرفیت نهایی بتن فوق توانمند در سطح عملکرد فروریزش حداقل ۷ درصد و حداکثر ۲۶ درصد بهبود عملکرد نسبت به بتن معمولی داشته است.*

واژه‌های کلیدی پل، بتن فوق توانمند، تحلیل دینامیکی افزاینده، منحنی شکنندگی، شاخص‌های آسیب.

Seismic Evaluation of Multi-Span Reinforced Concrete Bridges with Ultra High-Performance Concrete Piers Using Fragility Curves

Hamed Ghadimi Moghaddam Fereshteh Emami Mohammad Reza Mansoori

Abstract *Bridges play a vital role in transportation, traffic management, and providing access to strategic locations, especially during crises. Earthquakes are unpredictable events that disrupt critical transportation routes and damage important structures. Innovative technologies, such as Ultra High-Performance Concrete (UHPC), offer hope for enhancing structural flexibility and reducing damage. UHPC, known for its uniformity, low permeability, and durability, increases the resistance of bridges to seismic forces and limits the spread of damage. One of the most effective methods for assessing seismic vulnerability is Fragility Analysis. This study evaluates urban bridges with UHPC concrete columns supporting cast-in-place concrete T-beam superstructures. The analysis was conducted using CSI Bridge software, and appropriate ground motion records were selected for Incremental Dynamic Analysis (IDA) and damage level calculations. The results indicate that the probability of damage exceeding a certain threshold in UHPC concrete piers is lower compared to those made of ordinary concrete. Examining damage intensity levels reveals that highperformance concrete, in Collapse state scenario, improves performance by a minimum of 7.14% and up to 26.09% in the best-case scenario compared to Conventional concrete.*

Key words Bridge, Ultra High-Performance Concrete, Incremental Dynamic Analysis, Fragility Curve,Damage index.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۷/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۲/۲۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه سازه و زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران. **Email:**f-emami@srbiau.ac.ir

(۳) استادیار گروه سازه و زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

مقدمه

پل‌ها یکی از اجزای حیاتی شبکه‌های حمل و نقل محسوب می‌شوند که مناطق مختلف را به هم متصل کرده و عبور و مرور را تسهیل می‌نمایند. از نظر تاریخی عمدتا جهت عبور و مرور طراحی می‌شدند، در حالی که پل‌های معاصر نقش به‌سزایی در تقاطع‌های غیر هم‌سطح جهت کاهش زمان عبور و مرور و کاهش حجم ترافیک دارند که یکی از مؤثرترین عناصر شریانی به شمار می‌روند. این سازه‌ها بسته به نوع مصالح مصرفی و شیوه بهره‌برداری و نگه‌داری، عمری بین ۳۰ تا ۸۰ سال دارند که با استفاده از مصالح با مشخصات و دوام برتر می‌توان عمر آن‌ها را تا چند قرن افزایش داد [1]. در میان انواع پل‌ها با مصالح مختلف، پل‌های بتنی دارای جایگاه برجسته‌ای هستند که نه‌تنها به دلیل یکپارچگی ساختاری بلکه به دلیل جذابیت زیبایی‌شناختی در طراحی و معماری نیز شهرت دارند. دغدغه‌های جوامع امروزی در زمینه توسعه پایدار، طراحی و ساخت پل، استفاده از روش‌ها و مصالحی است که ساخت و ساز سریع پل‌ها را میسر ساخته و ضمن ایجاد سازه‌ای مقاوم و کارآمد، از مشکلات و معضلات ناشی از ساخت در محل جلوگیری می‌کند [2]. یکی از دستاوردهای مهم در زمینه تکنولوژی بتن، ساخت بتنی مقاوم و با خواص فوق‌العاده تحت عنوان بتن فوق توانمند است که اولین بار در سال ۱۹۹۰ با بهره‌گیری از خصوصیات ۳ نوع بتن خود تحکیم (SCC)، بتن توانمند (HPC)، بتن مسلح حاوی الیاف (FRC) ساخته شده است و با ساختاری یکپارچه و دانه‌بندی همگن، نه تنها مقاومت فشاری بالایی را فراهم کرده، بلکه تحت کشش نیز عملکرد مناسبی از خود نشان می دهد [3-5]. در راستای ساخت و ساز سریع پژوهشی در سال ۲۰۱۵ در آمریکا بر روی اتصالات بتنی پایه به فونداسیون با استفاده از بتن فوق توانمند انجام گرفت که توانایی ستون‌ها در افزایش ظرفیت نهایی را نشان داد [6]. در راستای ساخت و ساز سریع پل‌ها، پژوهشی بر روی اتصالات UHPC موجود در بین شاه‌تیرهای پیش‌ساخته پیش‌تنیده انجام گرفت که امکان استفاده از این اتصال را در پل‌ها با دهانه‌های طولانی فراهم می‌کرد و تحت بارگذاری‌های شدید دینامیکی در محدوده خطی باقی می‌ماند [2]. این نتایج ارزشمند باعث شد تا گام مهمی در زمینه استفاده از اجزای پیش ساخته برداشته شود چرا که یکی از مشکلات در زمینه ساخت و ساز سریع مقاومت پایین اتصالات ساخته شده در محل بود و بتن فوق توانمند فرصتی را برای ایجاد اتصالات ساده فراهم کرده بود که این اتصالات عملکرد مناسبی در زمینه بهره‌برداری طولانی مدت سازه داشته باشند [7].

علاوه بر کاربردی که بتن فوق توانمند در زمینه اتصالات اجزای پل دارد، از عملکرد مناسبی در زمینه ساخت و ترمیم عرشه پل‌ها نیز برخوردار است. در سال ۲۰۱۹ تحقیقی بر روی عرشه پل کامپوزیتی که با استفاده از بتن مسلح و لایه‌ای از بتن فوق توانمند ساخته شده بود انجام گرفت که استفاده از لایه بتن فوق توانمند ظرفیت نهایی عرشه را افزایش داد و نقش به‌سزایی در کنترل عرض ترک داشت [8]. علی رغم وجود تمامی برتری‌های ذکر شده و نتایج موجود، بتن فوق توانمند جزو مصالح نوآورانه و نوظهور به شمار می‌آید و به علت فقدان آئین‌نامه‌های طراحی و اطلاعات لازم در زمینه عملکرد لرزه‌ای این نوع بتن در عناصر اصلی سازه و پل‌ها می‌بایست مدل‌سازی و بررسی عملکرد لرزه‌ای بتن فوق توانمند در اجزاءِ مختلف پل و مقایسه آن با مصالح مرسوم بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی صورت گیرد. در سال ۲۰۲۱ پایه‌های مستطیلی تو خالی ساخته شده با بتن فوق توانمند در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد استفاده از بتن فوق توانمند در این مدل‌سازی نشان داد که در مناطق با شدت لرزه‌ای کم تا حد قابل توجهی می‌توان نسبت میلگردها را کاهش داد [9]. تحقیقی بر روی ضخامت لایه بتنی ساخته شده با بتن فوق توانمند انجام شد؛ نتایج نمودار تنش–کرنش ایجاد شده نشان داد با کاهش ضخامت لایه بتنی، کرنش اوج و مدول الاستیسیته تغییری نکرد اما مقاومت فشاری آن افزایش یافت [10]. با وجود برتری‌های قابل ملاحظه بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی که در نتایج مدل‌سازی‌ها و تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده شد؛ بتن فوق توانمند در زمینه کشش دارای مشکلات و ضعف‌هایی می‌باشد که محققان در راستای بهبود این مشکل از الیاف‌های گوناگون استفاده کردند که نتایج نشان داد استفاده از الیاف در بتن فوق توانمند نه تنها باعث بهبود عملکرد این بتن در کشش شده است بلکه تحت فشار نیروهای محصورکننده مختلف، میزان نزول تنش پس از نقطه اوج با شیب ملایم‌تری به پایان می‌رسد [11].

در سالیان اخیر با توجه به رشد جمعیت در شهرها و وجود حوادث طبیعی و انسانی مختلف از جمله زلزله و انفجار، لزوم ارزیابی، ساخت و مقاوم‌سازی انواع سازه‌ها از جمله پل‌ها بیش

از پیش احساس می‌گردد. با وجود تحقیقات آزمایشگاهی فراوان در زمینه بررسی و ارزیابی بتن فوق توانمند، هنوز ابهاماتی برای جوامع مهندسی جهت استفاده از این نوع بتن در اجزای حیاتی سازه‌ها وجود دارد که نیازمند بررسی و مدل‌سازی این نوع مصالح در سازه‌هایی مانند پل می‌باشد؛ تا ضمن مقایسه این نوع مصالح با بتن معمولی، عملکرد این نوع بتن در برخود با زلزله ارزیابی گردد. یکی از روش‌های پیشرفته ارزیابی، استفاده از تحلیل دینامیکی افزاینده است که با انجام مجموعه‌ای از تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی و با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و حوزه نزدیک انجام می‌گردد و علاوه بر دقت بالایی که دارد رفتار غیر خطی سازه را نیز در بر می‌گیرد. در نظر گرفتن ظرفیت غیر خطی سازه علاوه بر اینکه باعث به دست آمدن درک درستی از رفتار سازه می‌شود از لحاظ طراحی نیز کاملا اقتصادی می‌باشد [12]. در همین راستا از تحلیل دینامیکی افزاینده به جهت به دست آوردن پارامتر ضریب رفتار برای سیستم قاب بتن آرمه با دیوار برشی فولادی نازک جهت انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده گردید تا از ظرفیت غیر خطی مصالح در طراحی استفاده شود [13]. استفاده از شتاب‌نگاشت‌های متنوع در تحلیل دینامیکی غیر خطی بسیار حائز اهمیت است چرا که شتاب‌نگاشت‌های زلزله دارای محتوای فرکانسی به خصوصی می‌باشند که هر کدام تأثیر به خصوصی بر پاسخ سازه می‌گذارند [13]. طی تحقیقی که بر روی منابع زیرزمینی مکعبی تحت اثر زلزله حوزه دور گسل انجام گرفت؛ مشخص شد که تغییر مکان افقی ماکزیمم تا حد زیادی به ماهیت زلزله بستگی دارد [14]. یکی از مشکلاتی که در انجام تحلیل‌های دینامیکی افزاینده وجود دارد؛ بحث زمان‌بر بودن این نوع تحلیل است که با استفاده از روش‌های معادل‌سازی و ساده‌سازی مدل‌ها می توان تا حد زیادی این مشکل را بر طرف کرد تا ضمن دستیابی به پاسخ های متنوع سازه تحت اثر زلزله‌های گوناگون، درک درستی از رفتار سازه به دست آید [15].

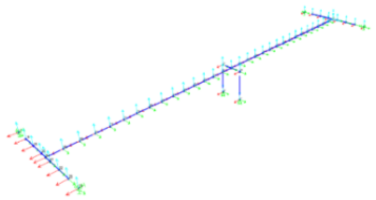
ارزیابی احتمال خسارت در سازه با استفاده از توزیع‌های آماری مختلف بر روی داده‌های تحلیل دینامیکی افزاینده انجام می‌پذیرد که تحلیل شکنندگی نام دارد [16]. این منحنی‌های شکنندگی ابزاری هستند که به طور گسترده در ارزیابی خطر لرزه‌ای استفاده می‌شوند که برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ ارائه شد [17]. به طور ویژه در تحقیقی عملکرد لرزه‌ای پل تک‌دهانه بررسی شد که به لطف استفاده از منحنی‌های شکنندگی و استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی از دقت بالایی برخوردار بود [16,18]. از منحنی‌های شکنندگی برای مقایسه عملکرد لرزه‌ای یک سازه با متغیرهای مختلف استفاده می‌شود که می‌توان با استفاده از نتایج به دست آمده تأثیر متغیر موجود را بر عملکرد شکنندگی سازه بررسی کرد. عباسی و همکاران با استفاده از منحنی‌های شکنندگی عملکرد لرزه‌ای پل‌های بتنی جعبه‌ای چنددهانه را در چهار سطح بی‌نظمی بررسی و ارزیابی کردند [19].

در این مطالعه رفتار لرزه‌ای پل‌های تیر- دال بتنی با عرشه پیوسته و تأثیر استفاده از بتن فوق توانمند در ساخت پایه‌های پل با ارتفاع‌های ۵ متر و ۸ متر بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها، تحت اثر زلزله‌های مختلف که بر اساس Fema-P695 استخراج شده است با استفاده از حدود خرابی تعیین شده توسط HAZUS و انجام تحلیل شکنندگی پل‌ها، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد . بدین منظور ۴ تیپ پل تیر- دال بتنی با عرشه پیوسته با ارتفاع پایه‌های ۵ متر و ۸ متر با استفاده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی (C25) در نرم‌افزار CSI Bridge مدل‌سازی شد. پاسخ لرزه‌ای پایه پل‌ها تحت تحریک ۷ شتاب‌نگاشت حوزه دور و ۷ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و با استفاده از مجموعه تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی تحت عنوان تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) در ارتفاع‌های ۵ و ۸ متر با مصالح مختلف به دست آمد. سپس با استفاده از حدود خرابی تعیین شده در HAZUS و بر اساس تغییر مکان نسبی پایه پل در پنج حالت بدون آسیب، خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل و با بهره‌گیری از روش‌های احتمالاتی ، منحنی شکنندگی پایه پل‌ها با ارتفاع‌های ۵ متری و ۸ متری به دست آمد که به کمک حالات حدی تعیین شده احتمال وقوع و فراگذشت خسارات در هر یک از ۵ حالت تعیین شده بیان می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد بتن فوق توانمند ظرفیت پذیرش سطوح بالاتری از لرزش زمین را در هر یک از حالات حدی تعریف شده نسبت به بتن معمولی (C25) دارد و لازم به ذکر است بیشترین بهبود رفتار پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی در پایه‌های ۵ متری و ۸ متری در حوزه نزدیک رخ داد و این برتری رفتار در تمامی شاخص‌های آسیب نسبت به حوزه دور صادق است.

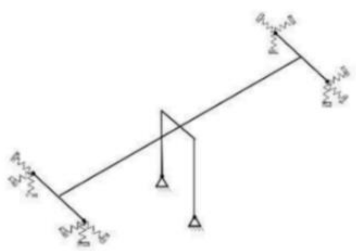
اعتبار سنجی

روش‌ها و فرضـــیات مختلفی جهت مدل‌ســـازی وجود دارد؛ مدل سازی انجام شده در این پژوهش بر ا ساس [20] و [21] و به صورت سه‌بعدی و بر ا ساس المان قاب انجام شده ا ست و باتوجه به پیچیدگی‌های مختلف و رفتار منحصـــر به فرد هر پل، لازم اســـت تا با مدل‌ســـازی پلی مشـــابه با موضـــوع پژوهش و مقایسه نتایج حا صل از روش‌های مدل‌سازی به کار گرفته شده با نتایج موجود از پل معیار، روش کار صـحت‌سـنجی گردد. در همین راستا از گزارشی که توسط [22] برای PEER انجام‌گرفته بود استفاده شد و پل نوع B در این مقاله که مربوط به پل خیابان La Veta در شهر توستین ایالت کالیفرنیا است جهت مدل‌سازی و اعتبارســنجی انتخاب گردید؛ این پل بتنی با عرشــه جعبه‌ای ۶ سلولی شامل دو دهانه پیوسته به طول ۴۴/۲ و ۴۷/۲ متر است و پایه‌های این پل دارای ۲ ســتون به قطر ۱/۷ مترو ارتفاع ۶/۷ متر می‌با شد که سر ستون آن با عر شه پل به صورت یکپارچه اجرا گردیده اســت و شــرایط مرزی پایه با فونداســیون به صــورت مفصــل می‌باشــد و کوله‌ها به صــورت ســاده و با اســتفاده از المان‌های لینک خطی مدل‌ســازی شـــدند همچنین لازم به ذکر است که عرض عرشه ۲۳ متر و عمق آن ۱/۹ متر بوده که دارای دو خط ترافیکی در هر جهت می‌باشد.

به جهت ارزیابی و اعتبارسنجی، پل نوع B با مشخصات و روش مذکور در نرم‌افزار CSI Bridge مدل‌سازی شد و تصاویری از مدل‌سازی در این تحقیق و مدل‌سازی توسط کاویانی و همکاران در نرم‌افزار Open SEES در شکل (۱) قابل مشاهده است و جهت بررسی و صحت‌سنجی پایداری کلی سازه تحلیل مودال بر روی نمونه مدل‌سازی شده اجرا شد که نتایج مقایسه تغییر شکل‌های مودال در مودهای اول و سوم در شکل (۲–الف) و مقادیر دوره تناوب مودهای اول تا سوم در جدول (۱) بیانگر قرابت و نزدیک بودن عملکرد پل مدل‌سازی شده با کار کاویانی و همکاران است. همچنین به جهت بررسی و اعتبارسنجی عملکرد پل مدل‌سازی شده تحت بارگذاری دینامیکی از شتاب‌نگاشت زلزله Northridge (PEER RSN (1086)) با ضریب g ۱/۲۸ استفاده شد و گره شماره (۲۴)، به‌عنوان گرهی میانی در کوله پل مدل‌سازی شده، انتخاب گردید و نتیجه جابه‌جایی طولی کوله در این گره با نتیجه جابه‌جایی طولی کوله در تحلیل انجام شده توسط Liang و Mosalam بر روی مدل ساخته شده (توسط کاویانی و همکاران) در شکل (۲–ب) مقایسه شد لازم به ذکر است که خط قرمز در شکل (۲–ب) بیانگر نمودار پاسخ جابه‌جایی طولی کوله پل مدل‌سازی شده با نرم‌افزار CSI Bridge در گره (۲۴) است و خط مشکی در شکل (۲–ب) بیانگر نمودار پاسخ جابه‌جایی طولی کوله در تحلیل انجام شده توسط Liang و Mosalam [23] در نرم‌افزار Open SEES می‌باشد. ارزیابی و مقایسه نتایج نشان می‌دهد با توجه به متفاوت بودن نرم‌افزارهای مدل‌سازی و ماتریس‌های سختی جهت تحلیل و ارزیابی نمونه مورد نظر، نتایج با تقریب خوبی قابل قبول است و نتایج مشابهی به دست آمده است که نشان از دقت خوب در مدل‌های تحلیلی انتخاب شده است و این ارزیابی نشان می‌دهد این روش مدل‌سازی در طیف وسیعی از پل‌ها با رفتار دینامیکی متفاوت با دقت مطلوبی قابل استفاده است.

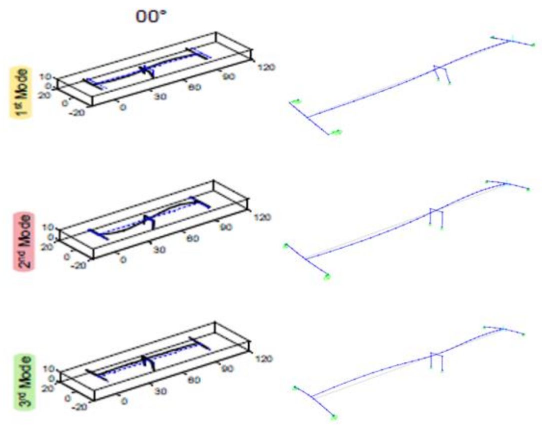


(الف)

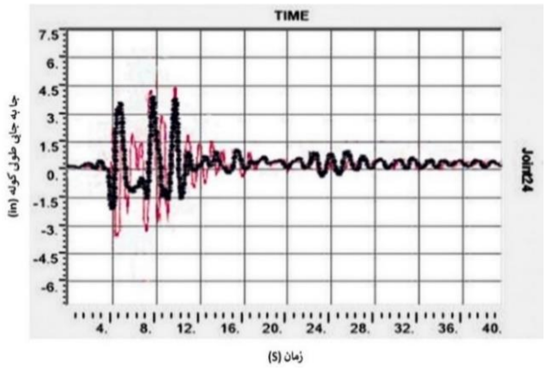


(ب)

شکل ۱ نمایی از نمونه پل مدل‌سازی شده در نرم‌افزارهای: (الف) CSI Bridge و (ب) Open SEES [22]



(الف)



(ب)

شکل ۲ (الف) مقایسه اشکال مودی نمونه پل مدل‌سازی شده با کار کاویانی و همکاران [22] و (ب) مقایسه جابه‌جایی طولی کوله تحت اثر زلزله Northridge با تحلیل انجام شده توسط Liang و Mosalam در نرم‌افزار Open SEES [23]

جدول ۱ مقایسه نتایج مودهای اول تا سوم پل مدل‌سازی شده [22]

	مود اول(s)	مود دوم(s)	مود سوم(s)
نتایج پل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار CSI-Bridge	۱/۰۳	۰/۵۵	۰/۴۱
نتایج مندرج در کار کاویانی و همکاران	۱/۰۹	۰/۵	۰/۳۵

مدل‌سازی

در این تحقیق، به جهت اطمینان از عملی بودن و کاربردی بودن یافته‌های پژوهش، پل‌های شهری معمولی دارای سیستم‌تیر- دال بتنی انتخاب شدند. این پل‌ها نشان‌دهنده طراحی رایج و پرکاربرد در زیر ساخت‌های حمل و نقل مدرن هستند. هدف از این پژوهش ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و آسیب‌پذیری این پل‌ها با پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند است.

برای تسهیل تحلیل، از روش‌ها و ابزار مدل سازی پیشرفته موجود در نرم‌افزار CSI Bridge 2016 استفاده شده و فرایند مدل سازی نمونه پل‌های مورد بررسی در این پژوهش به شکل سه‌بعدی و بر اساس المان و اجزای قاب مدل‌سازی شدند. مدل‌سازی با روش المان‌های قاب جهت به تصویرکشیدن ویژگی‌های اجزای سازه‌ای پل‌ها و تسهیل تجزیه و تحلیل جامع رفتار مدل‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف می‌باشد [22]. علاوه بر این، از ابزار Bridge Wizard در نرم‌افزار استفاده شده که امکان بازسازی دقیق شرایط پل در دنیای واقعی نیز فراهم گردیده است.

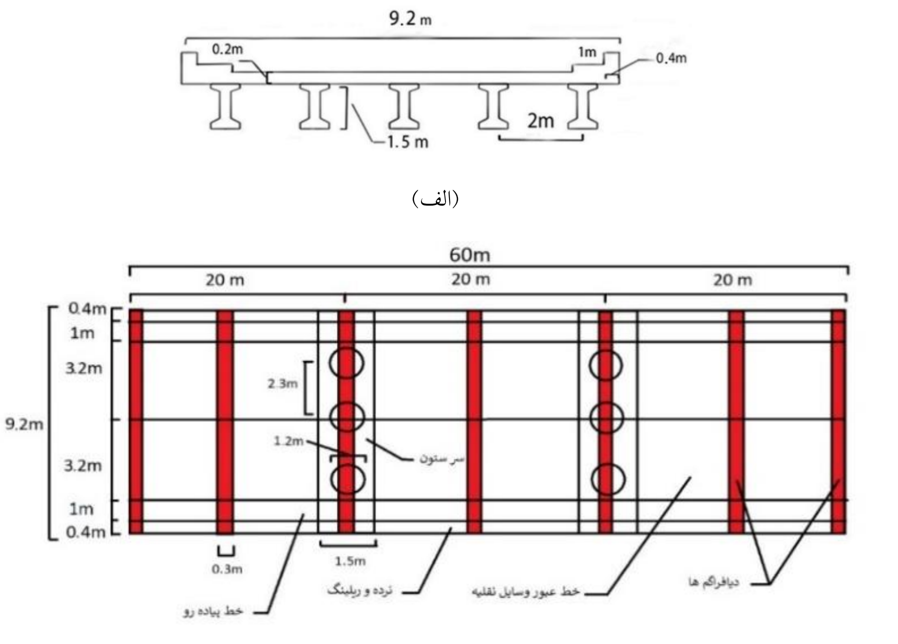
علاوه بر این، بالشتک‌ها و تکیه‌گاه‌های الاستومری که اجزای اساسی در سازه‌های پل هستند با استفاده از المان لینک خطی و بر اساس کاتالوگ شرکت گومبا طراحی و مدل‌سازی گردید این رویکرد نشان‌دهنده پیوند مطلوبی بین اجزای روسازه و زیرسازه هست، و این امکان را فراهم می‌سازد تا با افزایش دوره تناوب در سازه خسارات کمتری به کلیه مدل‌ها در طول رویدادهای لرزه‌ای وارد شود همچنین جهت توصیف مؤثر رفتار غیر خطی سازه‌های پل، در نزدیکی اتصال پایه به سر پایه و پایه به فونداسیون مفاصل پلاستیک بر اساس ASCE 41-17 تعریف گردید [24]. در این روش می‌توان برهم‌کنش‌ها و تغییر شکل‌های پیچیده‌ای را که در پایه‌ها، به‌ویژه در پاسخ به نیروهای لرزه‌ای رخ می‌دهد، در نظر گرفت و با گنجاندن این عناصر غیر خطی در مدل‌سازی، ظرفیت غیر خطی سازه را لحاظ کرد تا رفتار نمونه‌ها در برابر تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی بیش از پیش به واقعیت نزدیک باشد.

ذکر این نکته ضروری است که متغیر اول نوع بتن مصرفی در پایه پل و متغیر دوم ارتفاع پایه‌های پل می‌باشد و به غیر از این دو متغیر سایر ابعاد و مشخصات اجزای پل در تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد. این رویکرد این امکان را فراهم می سازد تا به طور مشخص تأثیر ارتفاع و مصالح مصرفی در پایه بر عملکرد لرزه‌ای پل‌ها به صورت مجزا ارزیابی گردد و اطمینان حاصل شود که نتایج در یک چارچوب آزمایشی قوی و کنترل‌شده است.

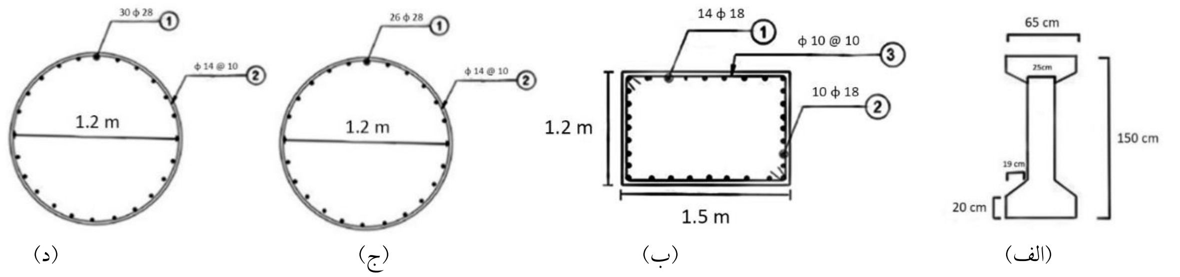
مشخصات هندسی

در این تحقیق برای تحلیل و طراحی پل‌های بتنی تیر- دال در نرم‌افزار CSI-Bridge از آیین‌نامه‌های داخلی و خارجی مانند نشریه ۱۳۹ (آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها)، نشریه ۴۶۳ (آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله)، نشریه ۳۸۹ (آیین‌نامه طرح و محاسبه پل‌های بتن‌آرمه) و آیین‌نامه طراحی پل‌های آمریکا AASHTO استفاده شد و بارگذاری‌ها به جهت تحلیل و طراحی نمونه پل مدل‌سازی شده بر اساس بارهای مرده و زنده شامل بارهای مرده نوع اول (وزن اصلی مقاطع) و نوع دوم (بارهای آسفالت و نرده گذاری‌ها و بار پیاده‌رو) و بار زنده کامیون ۴۰ تنی ایرانی، اثرات دما و ترکیب بارهای مقاومت و بهره‌برداری مندرج در این آیین‌نامه‌ها استفاده گردید [28-25]. پل مورد مطالعه دارای پیکربندی سه دهانه، پیوسته، تیر- دال بتنی است که طول کلی آن ۶۰ متر و عرض کلی عرشه ۹/۲ متر می‌باشد. عرشه پل دارای دو خط ترافیک بوده که عرض هر کدام ۳/۲ متر است. علاوه بر این، در دو طرف عرشه پل، گذرگاه‌های عابر پیاده وجود دارد که هر کدام ۱ متر عرض دارند و مسیری ایمن و قابل دسترس برای عابران پیاده ارائه می‌دهند. در امتداد جهت طولی پل، پنج تیر به طور استراتژیک برای توزیع مؤثر بارها و تضمین یکپارچگی ساختار پل قرار گرفته، این آرایش ظرفیت باربری را بهینه می‌کند و عملکرد کلی پل را افزایش می‌دهد. مقطع عرضی و پروفیل طولی در شکل (۳) نمایش داده شده است.

هندسه شاه‌تیرهای بتنی موجود در روسازه دارای ارتفاع ۱/۵ متر، عرض بال ۰/۶۵ متر، ضخامت جان ۲۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲۰ سانتی‌متر برای بال‌ها می‌باشند (شکل ۴-الف). این تیرها ستون فقرات روبنای پل را تشکیل می‌دهند و پشتیبانی و توزیع بار بسیار مناسبی را ارائه می‌کنند.



شکل ۳ (الف) مقطع عرضی پل تیر-دال بتنی و (ب) پلان و جزئیات طولی پل



شکل ۴ جزئیات: (الف) شاه‌تیرهای پل، (ب) مقطع تیر سر پایه و جزئیات مقطع ستون پایه: (ج) با ارتفاع ۵ متر و د) با ارتفاع ۸ متر

در طراحی پل دیافراگم‌هایی با عرض ۳۰ و ارتفاع ۱۱۵ سانتی‌متر قرار گرفته است که به سختی و پایداری کلی پل کمک می‌کنند. این دیافراگم‌ها که با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر در ابتدا، انتها و وسط دهانه‌های پل قرار گرفتند نقش مهمی در توزیع نیرو در سراسر سازه ایفا کرده و ظرفیت تحمل بار جانبی را افزایش می‌دهند (شکل ۳-ب). همچنین تیرهای سر پایه، عناصر اصلی سازه‌ای هستند که روسازه را به ستون‌های زیرسازه متصل می‌کند که با ابعاد ۱/۲ متر عرض و ۱/۵ متر طول مدل‌سازی شده‌اند (شکل ۴-ب).

پایه‌های پل هر کدام شامل سه ستون دایره‌ای بوده که قطر هر کدام ۱/۲ متر است. این اجزای نقش بسیار مهمی در پایداری و ظرفیت باربری پل ایفا می‌نمایند که در جهت عرضی مانند قاب و در جهت طولی مانند طره عمل می‌کنند (جزئیات مقاطع ستون‌ها در شکل ۴). نکته قابل توجه در مدل سازی و طراحی پل ا ستفاده از بالشتک‌ها و جداگرهای لرزه‌ای الا ستومری برای جداسازی روسازه از زیرسازه می‌باشد. این طراحی نوآورانه مهندسان، با میرا کردن ارتعاشات وارد به پل، ظرفیت سازه را در برابر رویدادهای لرزه‌ای افزایش می‌دهد که در مناطق زلزله‌خیز نقش به سزایی در کاهش خ سارات دارد. کوله‌ها نیز اجزای مهم و حیاتی هستند که مانند پایه‌ها نقش کلیدی در پایداری و انتقال بارهای وارد بر پل به فوندا سیون دارند که به صورت بسته و با استفاده از المان لینک خطی مدل‌سازی شدند. این رویکرد عملکرد جامع و یکپارچه در ساختار پل را تضمین می‌کند [29].

مواد و مصالح

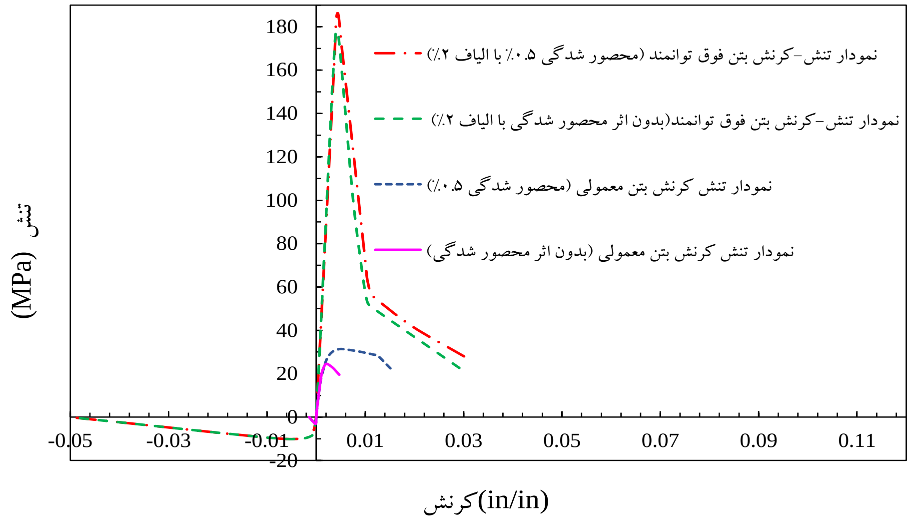
در مدل‌سازی کلیه اجزای پل، میلگرد اولیه مورد استفاده، میلگرد AIII بود که با تنش تسلیم $fy = 4000\ kg/cm^2$ و مقاومت کششی نهایی $fu = 6000\ kg/cm^2$ مشخص می‌شود. این انتخاب یکپارچگی ساختاری و ظرفیت باربری مدل‌های پل را تضمین می‌کند. برای ساخت عرشه پل در تمامی مدل‌ها از بتن C25 استفاده شده است. بتن C25 دارای مقاومت فشاری $f'_c = 250\ kg/cm^2$ است، که آن را به انتخابی قابل اعتماد برای اجزای عرشه پل تبدیل می‌کند. همچنین این نوع بتن در ساخت مدل‌های دارای پایه‌های بتنی معمولی به عنوان نمونه‌های معیار استفاده شده است که مشخصات کامل آن در جدول (۲) و نتیجه مقایسه نمودار تنش- کرنش بتن C25 بر اساس مدل ارائه شده توسط [21] با نمودار تنش کرنش بتن فوق توانمند که بر اساس تحقیقات [30] و [31] ترسیم شده در شکل (۵) نمایش داده شده است.

در مقابل، مدل‌هایی که دارای پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند (UHPC) هستند، از مشخصات خاصی بر اساس مشخصات ذکر شده در گزارش‌های FHWA بهره می‌برند. این مدل‌ها از بتن فوق توانمند با ۲٪ الیاف در ناحیه پوسته و بتن فوق توانمند با ۲٪ الیاف و ۰٫۵٪ ضریب محصورشدگی برای ناحیه هسته استفاده می‌کنند. انتخاب این مواد پیشرفته در افزایش مقاومت و انعطاف‌پذیری ساختاری پایه‌ها بسیار مفید است [32].

برای ثبت دقیق رفتار تنش- کرنش UHPC، از مطالعات Pereiro جهت مدل‌سازی ناحیه کششی این بتن استفاده شد که درکی ارزشمند در مورد رفتار کششی این نوع بتن ارائه می‌کند [30]. به طور مشابه، برای ناحیه فشاری از تحقیق انجام شده توسط نعیمی و همکاران به عنوان مرجع اصلی که امکان مدل‌سازی دقیق رفتار فشاری UHPC را فراهم می‌کند استفاده شد که مشخصات مکانیکی و نمودار تنش- کرنش نهایی و مقایسه آن با نمودار تنش- کرنش بتن معمولی به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۵) نمایش داده شده است [31]. این یافته‌ها بر اساس نتایج تحقیقات آزمایشگاهی بوده تا نتایج حاصل از تحلیل در این مقاله قابل استناد و نزدیک به واقعیت باشد.

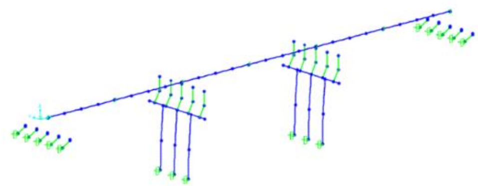
جدول ۲ مشخصات مکانیکی بتن‌های مصرفی [21,31,31]

نوع ماده	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت‌کششی (MPa)	ضریب پواسون (U)	مدول الاستیسیته(Ton/m^2)
بتن C25	۲۵	۳	۰/۲	۲۴۰۰۰۰۰
بتن UHPC	۱۷۷/۷۵	۱۰	۰/۱۸	۴۷۴۳۶۰۹

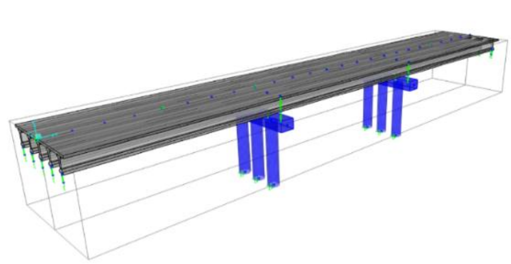


شکل ۵ مقایسه تنش- کرنش بتن معمولی و بتن فوق توانمند [21,31,32]

شکل (۶) نمایشی از مدل‌سازی تحلیلی نمونه‌های توصیف شده ارائه می‌دهند. شکل (۶- الف) نمایی از مدل‌های پل ساخته شده بر اساس رویکرد المان قاب را ارائه کرده که قاب سازه‌ای و اجزای حیاتی را به نمایش می‌گذارد. از سوی دیگر شکل (۶- ب)، نمایی از مدل‌های توسعه یافته در حالت Extrude را نشان می‌دهد که پیچیدگی‌های هندسه پل و تعامل بین عناصر ساختاری مختلف را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۶ نمایی از مدل‌های ساخته شده : (الف) بر اساس المان قاب و (ب) نمایی از مدل‌های ساخته شده در حالت Extrude

تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

بعد از ایجاد مدل‌های تحلیلی و انتخاب مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای مربوط به آن، نوبت بررسی دقیق رفتار دینامیکی سازه‌ها بودکه برای شبیه‌سازی طیف وسیعی از تحریک‌های لرزه‌ای و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر روی پل‌های مورد مطالعه، مجموعه‌ای از تحلیل‌های تاریخچه زمانی آغاز شد. این تجزیه و تحلیل‌ها به صورت سیستماتیک و با پیروی از اصول تحلیل دینامیکی غیر خطی افزایشی (IDA) انجام پذیرفت.

شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده در دو حوزه نزدیک و دور دارای ۳ مؤلفه لرزه‌ای شامل دو مؤلفه افقی و یک مؤلفه قائم می‌باشند که از بررسی اثر مؤلفه قائم طبق نشریه ۴۶۳ (آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله) صرف نظر شد و فقط اثر دو مؤلفه افقی شتاب‌نگاشت‌ها به عنوان ورودی به پل اعمال گردید. در پل‌های مطالعه شده پایه‌ها در جهت عرضی قاب بوده لذا سختی بیشتری نسبت به جهت طولی خود دارند. بر این اساس سختی در جهت عرضی بیشتر از جهت طولی پل می‌باشد. همچنین در مدل‌سازی پل‌ها برشگیر در جهت عرضی پل در نظر گرفته شده است که در تعریف بالشتک‌های الاستومری این موضوع لحاظ شده است. در بررسی‌های انجام شده و نتایج حاصل از تحلیل مشخص گردید که مقدار جابه‌جایی پایه در جهت عرضی پل نسبت به جابه‌جایی طولی بسیار اندک و ناچیز بود؛ بر این اساس در این تحقیق پاسخ جابه‌جایی پایه در جهت

طولی پل به عنوان معیار اصلی تحلیل‌های IDA و تهیه منحنی‌های شکنندگی قرار گرفت [26,33]. تجزیه و تحلیل برای هر مدل شامل تحلیل دینامیکی افزاینده تحت اثر ۷ شتاب‌نگاشت حوزه دور و ۷ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک (پالس‌دار) بود که سناریوهای لرزه‌ای متنوعی را منعکس کرده و ارزیابی دقیقی از عملکرد سازه‌ها تحت تحریکات لرزه‌ای میدان دور و نزدیک را تضمین می‌کند. این شتاب‌نگاشت‌ها طبق توصیه Fema-P695 انتخاب شدند تا طیفی از شرایط لرزه‌ای واقعی را که پل‌ها در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا ممکن است با آن‌ها مواجه شوند، در بر گیرند. بر اساس Fema-P695، زلزله شتاب‌نگارهایی که فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر تا گسل دارد شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک و زلزله‌هایی که شتاب‌نگار تا گسل، فاصله‌ای برابر با ۱۰ کیلومتر یا بیشتر دارد شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور اطلاق می‌شوند. در واقع شتاب‌نگاشت‌هایی که دارای بزرگا بیشتر از ۶/۵ ریشتر هستند زلزله‌هایی با بزرگای زیاد، به شمار می‌روند این زلزله‌ها بر اساس ATC-63 دارای شدت و زمان بیشتری هستند و مقادیر انرژی زیادی را تخلیه می‌کنند در مقابل زلزله‌ها با بزرگای کمتر از ۶/۵ ریشتر شتاب‌نگاشت هایی با بزرگای کم به‌حساب می‌آیند. این زلزله‌ها صرفا توانایی تخریب اعضای غیرسازه‌ای را داشته و حتی اگر با شدت زیادی به وقوع بپیوندد به دلیل مدت زمان لرزش کوتاهی که دارند نمی‌توانند اعضای سازه‌ای نوساز را تخریب کنند و نواحی محدودی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند در مقابل زلزله‌ها با بزرگای بیشتر از ۶/۵ ریشتر علاوه بر اینکه شدت و مدت‌زمان لرزش بیشتری دارند می‌توانند نواحی گسترده‌تری را تحت‌تأثیر خود قرار دهندکه امکان ارزیابی و پایش سازه تا رسیدن به مرحله فروریزش و تخریب را فراهم می‌کند از این رو در این مقاله از شتاب‌نگاشت‌هایی با بزرگای ۶/۵ تا ۷/۵ ریشتر استفاده گردید که اسامی شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و حوزه نزدیک به ترتیب در جدول‌های (۳-الف) و (۳-ب) بیان شده است [34]. همچنین برای در نظر گرفتن خصوصیات مربوط به ساختگاه و زمین احداث پروژه مورد نظر از خاک نوع ۲ و در منطقه‌ای با خطر لرزه‌ای بسیار الا استفاده شد که این ملاحظات برای ارزیابی واکنش سازه در چارچوب شرایط زمین‌شناسی واقعی، ضروری هستند.

نمودارهای IDA مربوط به هر شتاب‌نگاشت دارای دو مؤلفه عمودی و افقی تحت عنوان‌های سطح شدت (IM) و سطح آسیب (DM) می‌باشند و در واقع سطح شدت (IM) ورودی بر اساس پارامترهای لرزه‌ای مربوط به شتاب‌نگاشت، مانند PGV،PGD و یا PGA است که به مدل اعمال می‌شوند و سطح آسیب (DM) همان پارامتر تقاضای مهندسی است که متناظر با هر سطح شدت اعمال شده در تحلیل دینامیکی، اندازه‌گیری می‌شود، پارامترهای تقاضای مهندسی برای هر یک از اجزای پل متفاوت است؛ اما به طور عمومی می‌توان به جابه‌جایی نسبی پایه‌ها وکوله‌ها، شکل‌پذیری پایه‌های پل، تغییر شکل کلیدهای برشی اشاره کرد که در این پژوهش به جهت بررسی پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند از پارامتر لرزه‌ای بیشینه شتاب زمین (PGA) و جابه‌جایی نسبی پایه‌ها (Drift) به ترتیب به‌عنوان سطح شدت (IM) و سطح آسیب (DM) به جهت بیان پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) استفاده شد. پارامتر لرزه‌ای PGA، پارامتری ساده و قابل اعتماد از شدت لرزش زمین است که به راحتی اندازه‌گیری و تفسیر می‌شود و بیانگر بیشینه شتاب زمین مربوط به هر شتاب‌نگاشت است. این پارامتر لرزه‌ای بر اساس تحقیقات انجام شده در گذشته همبستگی مناسبی را بین تقاضای شکل پذیری جابه‌جایی ارائه می‌کند و بر خلاف سایر پارامترها مانند شتاب طیفی یا سرعت این امکان را فراهم می‌سازد تا فارغ از در نظر گرفتن دوره تناوب سازه و خصوصیات فردی هر شتاب‌نگاشت، رفتار سازه در برخورد با زلزله ارزیابی شود [35]. در ابتدا، برای استاندارد کردن مقایسه شتاب‌نگاشت‌ها، پارامتر لرزه‌ای بیشینه شتاب زمین (PGA) برای هر شتاب‌نگاشت به مقدار یکنواخت 1g مقیاس شد. این روش مقیاس‌کردن که با کمک نرم‌افزار Seismo Signal انجام گرفت، تضمین می‌کند که تمام شتاب‌نگاشت‌های زمین یک شتاب گرانشی معادل بر روی سازه‌ها اعمال می‌کنند، بنابراین ارزیابی منسجم و معنادار را تسهیل می‌کند [35].

متعاقبا، تحلیل‌های تاریخچه زمانی به شکلی نظام‌مند اجرا شدند. هر مدل در معرض طیفی وسیعی از بارهای افزایشی قرار گرفت که با گام 0/1g افزایش یافت. این رویکرد که به‌عنوان تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی شناخته می‌شود، این امکان را

فراهم می‌سازد تا به طور جامع پاسخ سازه و سطح آسیب تحت درجات مختلف شدت لرزه‌ای بررسی شود. با پیشرفت در تجزیه و تحلیل‌ها، داده‌های زیادی تولید شد که این امکان را مهیا می‌کند تا با ترسیم منحنی‌های IDA درک عمیقی در مورد آسیب‌پذیری لرزه‌ای و عملکرد پل‌ها تا رسیدن به سطح فروریزش به دست آید و با استفاده از سطوح آسیب به دست آمده و با کمک روش‌ها و ابزار احتمالاتی تابع توزیع نرمال (NDF) و تابع توزیع تجمعی(CDF) و استفاده از پارامترهای میانگین و انحراف معیار، منحنی‌های شکنندگی برای هر مدل در هر حوزه بر اساس حالات حدی تعیین شده ترسیم شد که با کمک این منحنی‌های شکنندگی احتمال فراگذشت خسارات در هر سطح عملکردی قابل پیش‌بینی است. منحنی‌های IDA مربوط به هر حوزه در شکل‌های (۷) تا (۱۰) به تفکیک هر مدل نمایش داده شده است.

این منحنی‌های شـــکنندگی که از طریق نتایج تحلیل IDA انجام گرفت، در مشخص‌کردن احتمال آسیب سازه در سطوح مختلف شتاب اوج زمین (PGA) و شدت‌های تحریک، بسیار مفید هســـتند. این رویکرد جامع احتمالاتی درک ما از پاســـخ سازه‌ها به نیروهای لرزه‌ای را افزایش می‌دهد و منبع ارزشمند و قابل استنادی برای ارزیابی لرزه‌ای سازه به جهت طراحی پل‌های با اهمیت زیاد و مدیریت خطر برای ســایر پل‌ها در زمان بحران به شمار می‌آید [36].

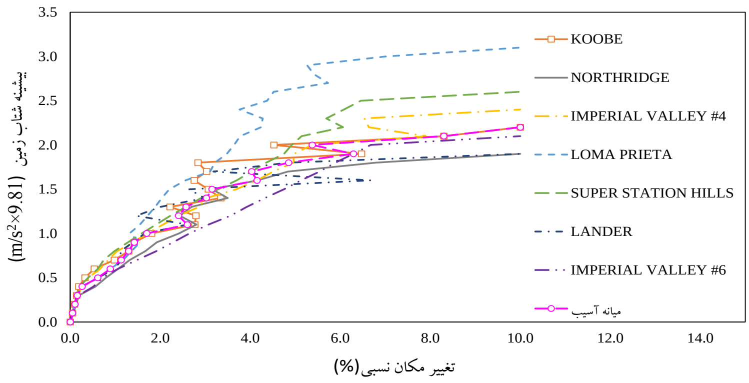
جدول ۳ شتاب‌نگاشت‌های: (الف) حوزه دور و (ب) حوزه نزدیک [34]

شماره	PEER RSN	نام زلزله	نام ایستگاه ثبت شتاب‌نگاشت	سال رخداد زلزله	بزرگا
۱	۱۸۱	Imperial Valley-06	El Centro Array #6	۱۹۷۹	۶/۵
۲	۷۲۳	Superstition Hills-02	Parachute Test Site	۱۹۸۷	۶/۵
۳	۸۰۲	Loma Prieta	Saratoga - Aloha Ave	۱۸۲	۶/۹
۴	۸۲۱	Erzican, Turkey	Erzincan	۱۹۹۲	۶/۷
۵	۸۲۸	Cape Mendocino	Petrolia	۱۹۹۲	۷
۶	۱۰۶۳	Rinaldi Receiving Sta	Northridge-01	۱۹۹۴	۶/۷
۷	۱۶۰۵	Duzce	Duzce, Turkey	۱۹۹۹	۷/۱۴

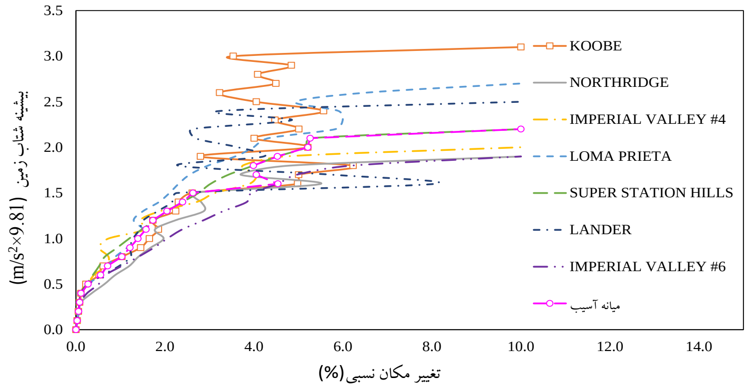
(الف)

شماره	PEER RSN	نام زلزله	نام ایستگاه ثبت شتاب‌نگاشت	سال رخداد زلزله	بزرگا
۱	۱۱۱۱	Koobe,Japan	Nishi-Akashi	۱۹۹۵	۶/۹
۲	۱۶۹	Imperial Valley	Delta	۱۹۷۹	۶/۵
۳	۹۰۰	Lander	Yermo Fire Station	۱۹۹۲	۷/۳
۴	۷۵۲	Loma prieta	Capitola	۱۹۸۹	۶/۹
۵	۷۲۱	Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	۱۹۸۷	۶/۵
۶	۱۶۶	Imperial Valley-06	Coachella Canal #4	۱۹۷۹	۶/۵۳
۷	۹۵۳	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	۱۹۹۴	۶/۷

(ب)

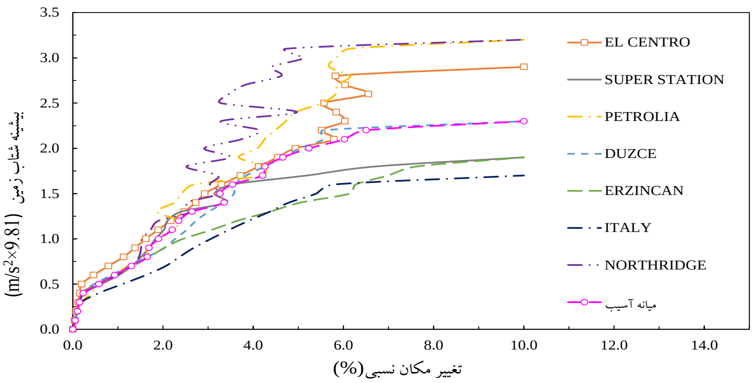


(الف)

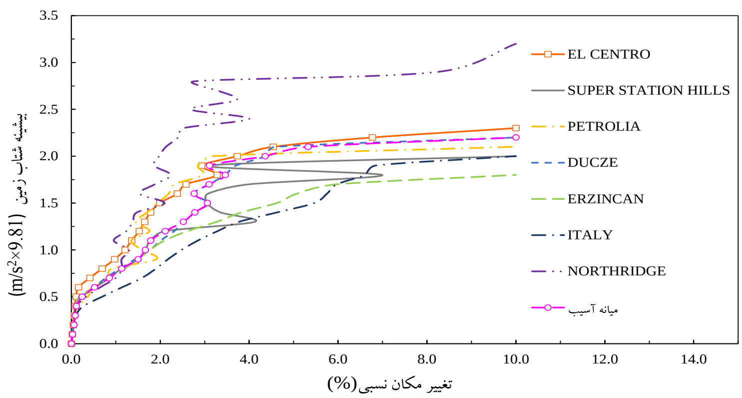


(ب)

شکل ۷ نمودار IDA پل تیر- دال بتنی با پایه‌های ۵ متری ساخته شده از: (الف) بتن معمولی و (ب) بتن فوق توانمند تحت زلزله حوزه دور

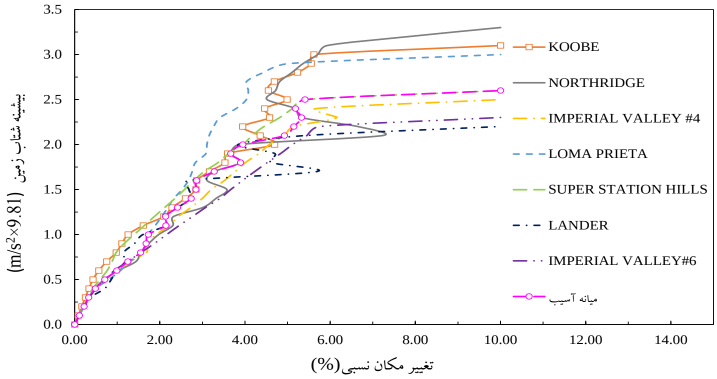


(الف)

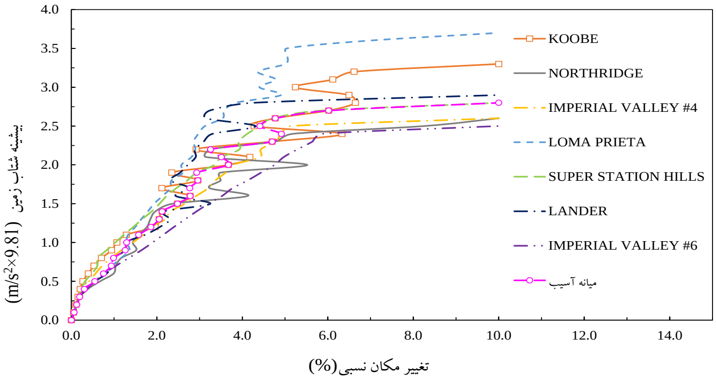


(ب)

شکل ۸ نمودار IDA پل تیر- دال بتنی با پایه‌های ۵ متری ساخته شده از الف) بتن معمولی و ب) بتن فوق توانمند تحت زلزله حوزه نزدیک

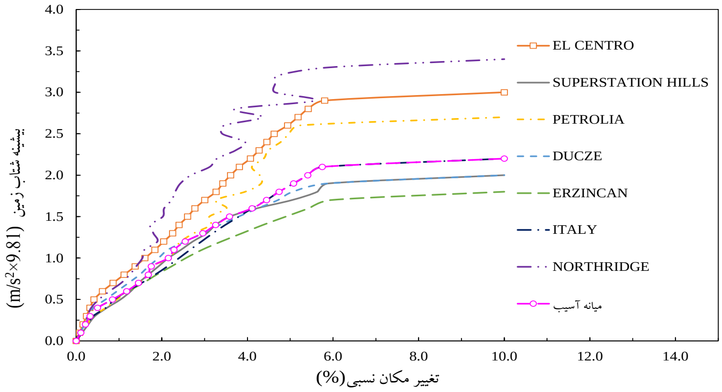


(الف)

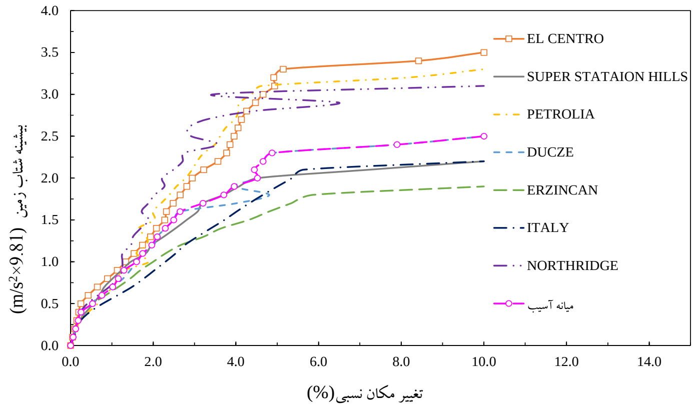


(ب)

شکل ۹ نمودار IDA پل تیر- دال بتنی با پایه‌های ۸ متری ساخته شده از: (الف) بتن معمولی و (ب) بتن فوق توانمند تحت زلزله حوزه دور



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ نمودار IDA پل تیر- دال بتنی با پایه‌های ۸ متری ساخته شده از الف) بتن معمولی و ب) بتن فوق توانمند تحت زلزله حوزه نزدیک

در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نمودارهای مربوط به تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) به تفکیک مدل‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند و بتن معمولی در هر حوزه ترسیم شده است. با دقت در این منحنی‌ها متوجه می‌شویم که همگی این منحنی‌ها در ابتدا صاف بوده و در ناحیه خطی قرار دارند با افزایش بیشینه شتاب زمین مفصل‌هایی در پایه‌های پل ایجاد شده و سازه وارد ناحیه غیرخطی می‌شود همچنین در این ناحیه شاهد شکست‌هایی در بعضی از نقاط نمودار های IDA هستیم که بیانگر سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت در پایه پل است که این سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت در نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند در مقایسه با نمونه ساخته شده با بتن معمولی به دلیل خواص مکانیکی ایجاد شده به واسطه مواد تشکیل‌دهنده، دانه‌بندی ریز و همگن و استفاده از الیاف، بیشتر است و در واقع الیاف به علت ایجاد محصورشدگی‌های غیرفعال تأثیر ویژه‌ای در بهبود و افزایش مقاومت و شکل‌پذیری پایه‌های پل دارد. منحنی‌های IDA در انتهای تحلیل و با وقوع فروریزش در پایه های پل تحت اثر هر شتاب‌نگاشت به‌صورت صاف و افقی به پایان می‌رسند.

شاخص خسارت

بررسی‌های اخیر در مورد آسیب‌های ناشی از زلزله نشان داده است که بخش قابل توجهی از آسیب‌های سازه‌ای در سیستم‌های پل در زیر سازه رخ می‌دهد. با شناخت نقش حیاتی پایه‌های پل در یکپارچگی ساختاری کلی پل‌ها، رویکردی متمرکز در ارزیابی آسیب لرزه‌ای اتخاذ شد که برای ارزیابی جامع پاسخ لرزه‌ای و آسیب احتمالی به پل‌های مورد مطالعه، تحلیل دقیقی انجام گرفت. در این تحلیل محاسبه جابه‌جایی نسبی پایه‌ها که یک معیار اساسی برای ارزیابی عملکرد و آسیب‌پذیری زیرساخت‌های پل است انتخاب شد [30]. پل‌های در معرض سناریوهای بارگذاری افزایشی، با استفاده از یک مجموعه شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده از ۷ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و ۷ شتاب‌نگاشت حوزه دور قرار گرفت. این رویکرد جامع، این امکان را فراهم می‌سازد تا طیفی از رویدادهای لرزه‌ای واقعی، شبیه‌سازی شده و تأثیر آن‌ها بر پایه‌های پل ارزیابی شود.

برای دسته‌بندی سطوح آسیب مشاهده شده در تحلیل‌ها و تسهیل مقایسه‌های معنادار، از شاخص‌های تعریف شده بر اساس HAZUS جهت نشان دادن درجات مختلفی از خسارت در سازه استفاده شد. جدول (۴) تعریف دقیقی از این شاخص‌های آسیب ارائه می‌کند که به عنوان یک مرجع استاندارد برای ارزیابی پاسخ و ظرفیت لرزه‌ای پایه پل‌ها به شمار می‌آید. با ارزیابی جابه‌جایی و تغییر مکان نسبی ستون‌های پایه پل تحت اثر هر شتاب‌نگاشت زلزله، درک عمیقی در مورد عملکرد و آسیب‌پذیری این اجزای حیاتی به دست می‌آید. این رویکرد سیستماتیک شرایطی را فراهم می‌سازد تا تأثیر بالقوه رویدادهای لرزه‌ای را بر زیرساخت‌های پل ارزیابی کرده و رویکردهایی را برای افزایش مقاومت و انعطاف‌پذیری سازه و کاهش خطر اتخاذ کرد.

جدول ۴ تعریف حالات خسارات : (الف) به صورت کیفی و (ب) به صورت کمی و بر مبنای Drift و بر اساس HAZUS [37]

(الف)

حالت خسارت	بیان کیفی
۱. بدون خسارت	پل هیچ خسارتی نداشته است
۲. خسارت کم	ترک‌خوردگی جزئی و پوسته‌شدن در کوله‌ها و ترک در کلیدهای برشی کوله‌ها، ریزش جزئی و ترک در مفاصل، ریزش جزئی در ستون و ترک‌خوردگی جزئی در عرشه (نیاز به بازسازی ظاهری و جزئی دارد)
۳. خسارت متوسط	هر ستون ترک‌خوردگی و پوسته‌پوسته شدن را در حد متوسط تجربه می‌کند (ستون از نظر ساختاری هنوز سالم است، ترک کلیدهای برشی
۴. خسارت زیاد	خرابی شدید در ستون‌ها بدون رخداد انهدام و خرابی تکیه‌گاه‌های بعضی از اتصالات
۵. فروریزش	انهدام تمامی ستون‌ها و اتصالات و فروپاشی قریب‌الوقوع سازه

ادامه جدول ۴ تعریف حالات خسارات : (الف) به صورت کیفی و (ب) به صورت کمی و بر مبنای Drift و بر اساس HAZUS [37]

(ب)

حالات خسارت	وضعیت	بیان کمی
بدون خسارت	اولین جاری شدن	۰/۰۰۵
خسارت کم	ترک و پوسته پوسته شدن	۰/۰۰۷
خسارت متوسط	از دست دادن لنگرگاه	۰/۰۱۵
خسارت زیاد	ریزش اولیه ستون	۰/۰۲۵
فروریزش	فروپاشی ستون	۰/۰۵

ارزیابی و تحلیل منحنی‌های شکنندگی

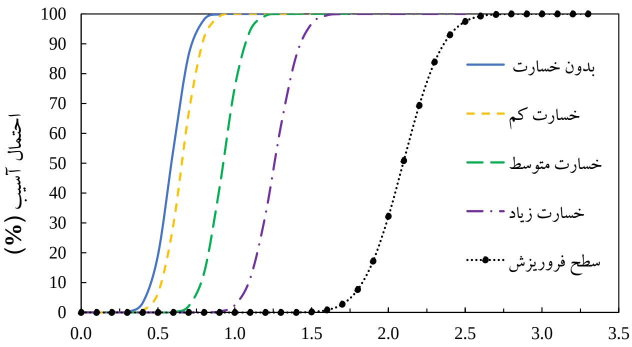
نتایج گسترده تحلیل شکنندگی یک نمای کلی و جامع از عملکرد سازه‌ای پل‌ها، زمانی که در معرض تحریکات زلزله حوزه دور و حوزه نزدیک قرار می‌گیرند، ارائه می‌کند. ارزیابی مبتنی بر شاخص‌های آسیب تعریف شده توسط HAZUS متمرکز است و امکان توصیف دقیق واکنش سازه را فراهم می‌کند.

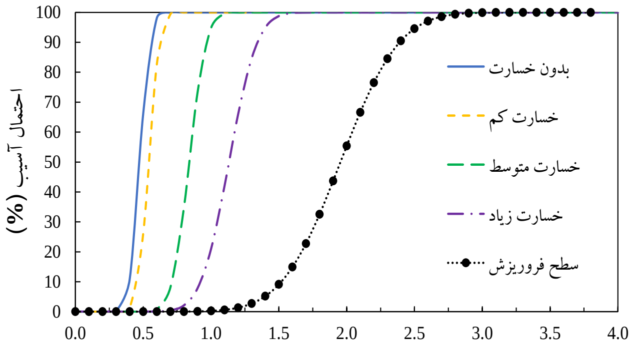
گروه ۱

در گروه ۱ که مربوط به رویدادهای لرزه‌ای میدان دور است، نتایج موجود به جهت مقایسه و ارزیابی به صورت دو دسته منحنی ارائه می‌شود. شکل (۱۱- الف) منحنی شکنندگی پل مجهز به پایه‌های بتنی با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC) را بر اساس ۵ شاخص آسیب تعریف شده نشان می‌دهد که هر کدام دارای پایه هایی با ارتفاع ۵ متر هستند. این منحنی درک واضحی از عملکرد ساختاری پل با پایه‌های UHPC در شرایط لرزه‌ای میدان دور ارائه می‌دهد. به طور مشابه ، شکل (۱۱- ب) منحنی شکنندگی یک پل را با پایه‌های بتنی معمولی (به ارتفاع ۵ متر) در شرایط لرزه‌ای حوزه دور نشان می‌دهد.

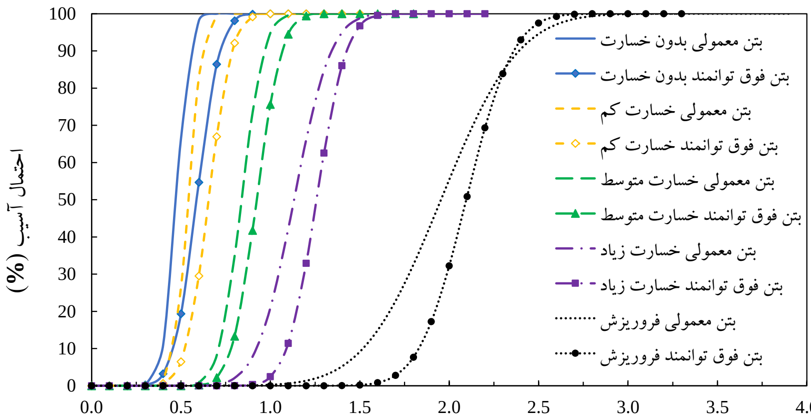
نتایج مقایسه و بررسی منحنی شکنندگی پایه‌های پل ساخته شده با بتن معمولی و بتن فوق توانمند (شکل ۱۱) تحت اثر زلزله‌های حوزه دور در شکل (۱۲) به تفکیک ۵ سطح عملکردی، بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش آمده است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که انحراف معیار پنج سطح آسیب تعریف شده بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش در پایه ساخته شده با بتن فوق توانمند به ترتیب ۰/۱۰۱، ۰/۱۰۲، ۰/۱۱۰، ۰/۱۳۰ و ۰/۲۰۰ می‌باشد و میانگین سطوح خسارات به ترتیب دارای مقادیر ۰/۵۸، ۰/۶۵، ۰/۹۲ ، ۱/۲۵ ، ۲/۰۹ است این در حالی است که در نمونه ساخته شده با بتن معمولی این مقادیر برای انحراف معیار به ترتیب ۰/۰۶۰ ، ۰/۰۶۳ ، ۰/۰۹۹ ، ۰/۱۶۰ ، ۰/۳۴۰ و برای میانگین آسیب‌ها به ترتیب ۰/۴۷، ۰/۵۴، ۰/۸۰ ، ۱/۱۳، ۱/۹۵ می‌باشد با مقایسه اعداد و ارقام می‌توان دریافت که میانگین مقادیر برای نمونه ساخته شده با بتن معمولی کمتر از میانگین نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند است که بیانگر مقاومت بالای مدل ساخته شده با بتن فوق توانمند تحت سطوح بالاتری از تحرکات زمین است. همین‌طور انحراف معیار نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند از نمونه ساخته شده با بتن معمولی بیشتر است که نشان از پراکندگی بیشتر مقادیر و بیانگر افزایش مقاومت، سخت‌شوندگی، و احیای متعدد و بیشتر بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور است. در جدول (۵) سطوح شدت در میانه خسارت به تفکیک سطوح عملکردی مختلف تعیین شده است. بررسی و ارزیابی این جدول نشان می‌دهد که استفاده از بتن فوق توانمند موجب افزایش ظرفیت خطی سازه شده به طوری که خسارت ۵۰ درصدی در سطح عملکردی بدون خسارت در شتاب ۰/۵۹g رخ داده است این در حالی است که میانه خسارت در پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی در سطح آسیب کم در شتاب ۰/۵۴g به وقوع پیوسته است و با توجه به تعاریف مندرج در جدول (۴-الف) بتن فوق توانمند علاوه بر افزایش ظرفیت خطی سازه، تأثیر به‌سزایی در کنترل عرض ترک دارد این افزایش مقاومت اولیه به واسطه استفاده از بتن فوق توانمند به طور مشخص اثر مثبتی بر ظرفیت نهایی سازه داشته به طوری که خسارت ۵۰ درصدی در سطوح آسیب زیاد و فروریزش به ترتیب در شتاب‌های ۱/۲۶g و ۲/۱g به وقوع پیوسته است و این میزان خسارت در پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی

در شتاب‌های ۱/۱۳g و ۱/۹۶g رخ داده است که استفاده از بتن فوق توانمند به ترتیب ۱۱/۵ درصد و ۷/۱۴ درصد بهبود رفتار نسبت به بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه دور داشته است. با افزایش سطوح شدت، میزان برتری پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند تحت اثر زلزله‌های حوزه دور نسبت به بتن معمولی کاهش یافته است به طوری که بیشترین میزان بهبود مربوط به سطح عملکردی بدون خسارت به میزان ۲۲/۹۲ درصد و کمترین بهبود مربوط به سطح فروریزش به مقدار ۷/۱۴ درصد می‌باشد.





شکل ۱۱ منحنی شکنندگی پایه ساخته شده از: (الف) بتن فوق توانمند و (ب) بتن معمولی با ارتفاع ۵ متر تحت زلزله حوزه دور



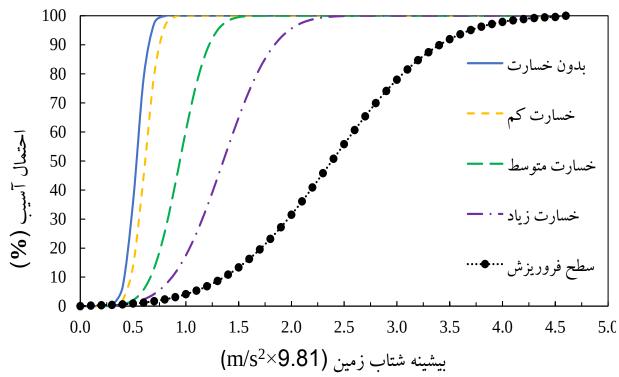
شکل ۱۲ مقایسه منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی با ارتفاع ۵ متر تحت اثر حوزه دور

جدول ۵ نتایج سطوح تحریک در نقطه میانی آسیب (مدل با ارتفاع پایه ۵ متر تحت اثر شتاب‌نگاشت حوزه دور)

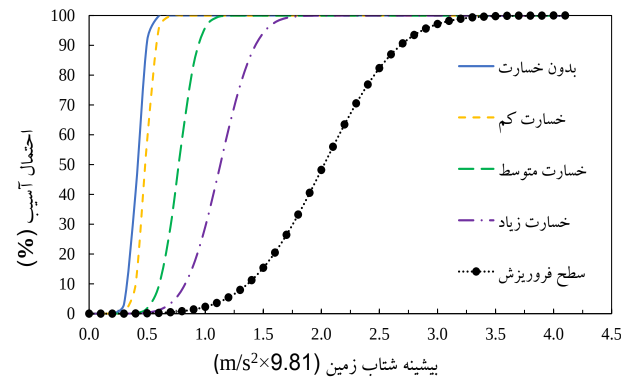
	بدون خسارت	خسارت کم	خسارت متوسط	خسارت زیاد	فروریزش
بتن فوق توانمند	۰/۵۹g	۰/۶۶g	۰/۹۳g	۱/۲۶g	۲/۱g
بتن معمولی	۰/۴۸g	۰/۵۴g	۰/۸۴g	۱/۱۳g	۱/۹۶g
درصد برتری بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی	۲۲/۹۲	۲۲/۲۲	۱۰/۷۱	۱۱/۵۰	۷/۱۴

گروه ۲

گروه ۲، نتایج بررســـی و ارزیابی عملکرد پایه پل‌ها با ارتفاع ۵ مترتحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک ارائه می‌نماید. شـکل (۱۳– الف) منحنی شـکنندگی یک پل با پایه‌های سـاخته شـده از بتن فوق توانمند (ارتفاع ۵ متر) تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک را نشان می‌دهد. در مقابل، شکل (۱۳– ب) منحنی شکنندگی پل با پایه‌های ســـاخته شـــده از بتن معمولی (ارتفاع ۵ متر) تحت بـارگـذاری لرزه‌ای حوزه نزدیـک ارائـه می‌کنـد. این داده‌هـا آسیب‌پذیری سازه و احتمال فراگذشت خسارات در پایه پل‌ها بر اســاس ۵ ســطح عملکردی تعیین شــده در HAZUS نشــان می‌دهند.



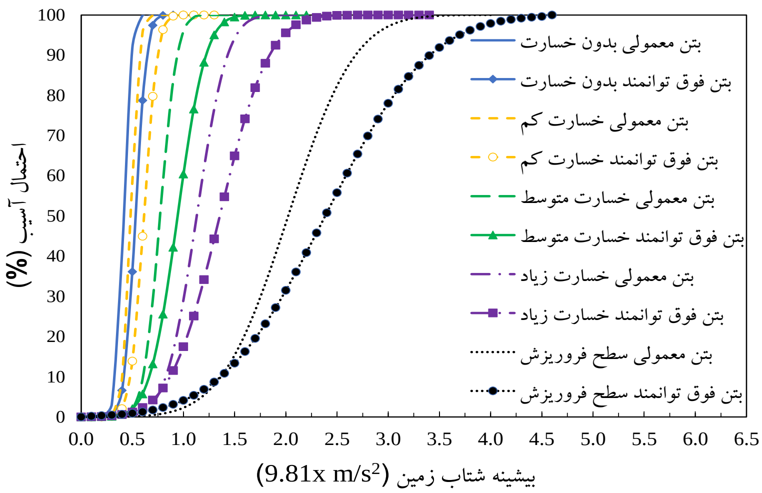
(الف)



(ب)

شکل ۱۳ منحنی شکنندگی پایه ساخته شده از: (الف) بتن فوق توانمند و (ب) بتن معمولی با ارتفاع ۵ متر تحت اثر زلزله حوزه نزدیک

نتایج مقایسه و بررسی منحنی شکنندگی پایه پل‌های ساخته شده با بتن معمولی و بتن فوق توانمند (شکل ۱۳) تحت اثر زلزله حوزه نزدیک در شکل (۱۴) بر اساس ۵ سطح عملکردی، بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش آمده است. نتایج به دست آمده بر اساس ۵ سطوح عملکرد، بدون آسیب، خسارت کم، متوسط، زیاد، فروریزش برای نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند به ترتیب دارای انحراف معیار ۰/۰۸۶، ۰/۱۰۴، ۰/۲۱۷، ۰/۳۷۹، ۰/۷۹۷ و میانگین ۰/۵۳، ۰/۶۱، ۰/۹۴، ۱/۳۳، ۲/۳۸ است که در مقابل نمونه ساخته شده با بتن معمولی دارای انحراف معیار ۰/۰۶۱، ۰/۰۶۶، ۰/۱۳۰، ۰/۲۳۵، ۰/۵۱۳ و میانگین ۰/۴۱، ۰/۴۸، ۰/۷۷، ۱/۱۲، ۲/۰۲ می‌باشد و بیانگر افزایش ظرفیت مقاومت نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند و ایجاد شکل‌پذیری مناسب و سخت‌شوندگی‌های متعدد نسبت به نمونه ساخته شده با بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک است. در جدول (۶) سطوح شدت در میانه خسارت به تفکیک سطوح عملکردی مختلف تحت اثر زلزله حوزه نزدیک تعیین شده است. بررسی و ارزیابی این جدول نشان می‌دهد میانه خسارت در سطح عملکردی بدون خسارت و خسارت کم در پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی به ترتیب در شتاب‌های ۰/۴۲g و ۰/۴۹g رخ داده است این در حالی است که میانه خسارت در سطح عملکردی بدون خسارت و خسارت کم در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند به ترتیب در شتاب‌های ۰/۵۳gو ۰/۶۲g به وقوع پیوست که به ترتیب ۲۶/۱۹ درصد و ۲۶/۵۳ درصد بهبود رفتار داشته است که علاوه بر افزایش ظرفیت خطی سازه، تأثیر فوق‌العاده‌ای در کنترل عرض ترک و جلوگیری از پوسته پوسته شدن مقاطع دارد. همچنین استفاده از بتن فوق توانمند در پایداری نهایی سازه نیز تأثیر زیادی داشته است به طوری که خسارت ۵۰ درصدی در پایه پل در سطوح عملکردی خسارت زیاد و فروریزش در شتاب‌های ۱/۳۶g و ۲/۳۹g به وقوع پیوست که به ترتیب بیانگر ۲۰/۳۵ درصد و ۱۷/۷۳ درصد بهبود رفتار در مقایسه با پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک می باشد. همچنین با مقایسه جدول (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که بتن فوق توانمند عملکرد بهتری تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور از خود به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱۴ مقایسه منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی با ارتفاع ۵ متر تحت اثر حوزه نزدیک

جدول ۶ نتایج سطوح تحریک در نقطه میانی آسیب (مدل با ارتفاع پایه ۵ متر تحت اثر شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک)

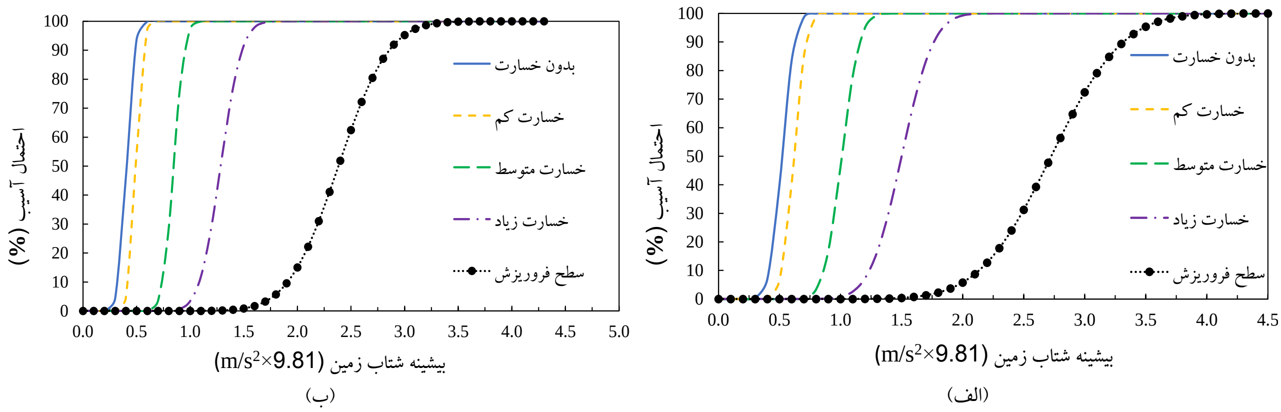
	بدون خسارت	خسارت کم	خسارت متوسط	خسارت زیاد	فروریزش
بتن فوق توانمند	۰/۵۳g	۰/۶۲g	۰/۹۵g	۱/۳۶g	۲/۳۹g
بتن معمولی	۰/۴۲g	۰/۴۹g	۰/۷۷g	۱/۱۳g	۲/۰۳g
درصد برتری بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی	۲۶/۱۹	۲۶/۵۳	۲۳/۳۸	۲۰/۳۵	۱۷/۷۳

گروه ۳

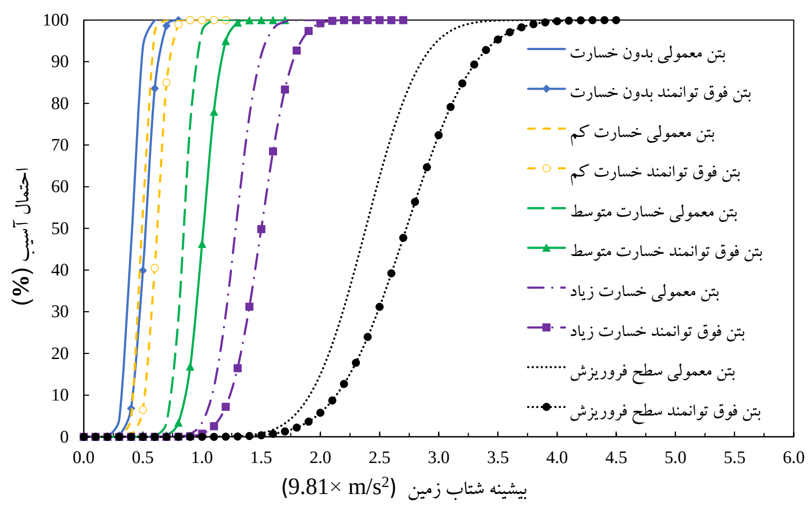
گروه ۳ به بررسی سناریوهای لرزه‌ای پایه پل‌ها با ارتفاع ۸ متر می‌پردازد. در شکل (۱۵- الف)، منحنی شکنندگی پل مجهز به پایه‌های UHPC (ارتفاع ۸ متر) تحت اثر زلزله‌های حوزه دور ارائه می‌شود که به طور مشابه شکل (۱۵- ب) منحنی شکنندگی پل با پایه‌های ساخته شده از بتن معمولی (ارتفاع ۸ متر) تحت بارگذاری لرزه‌ای میدان دور را نشـــان می‌دهد. این داده‌ها درک مناسبی در مورد تأثیر افزایش ارتفاع پایه بر پاسخ سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور ارائه می‌کند.

نتایج مقایسه و بررسی منحنی شکنندگی پایه پل‌های ساخته شده با بتن معمولی و بتن فوق توانمند با ارتفاع ۸ متر (شکل ۱۵) تحت اثر زلزله حوزه دور در شکل (۱۶) تحت عنوان ۵ شاخص آسیب، بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش آمده است. نتایج انحراف معیار نمونه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند در این ۵ سطح عملکرد به ترتیب ۰/۰۸۱، ۰/۰۸۳، ۰/۱۱۵، ۰/۲۰۵، ۰/۴۶۱ و میانگین آن به ترتیب ۰/۵۲، ۰/۶۱، ۱/۰۱، ۱/۵۰، ۲/۷۲ بوده و این در شرایطی است که برای بتن معمولی انحراف معیار به ترتیب دارای ۰/۰۶۱، ۰/۰۶۵، ۰/۰۷۹، ۰/۱۵۶، ۰/۳۶۹ و میانگین به ترتیب ۰/۴۰، ۰/۴۹، ۰/۸۴، ۱/۲۸، ۲/۳۸ می‌باشد و با ارزیابی نتایج استنباط می‌گردد که بتن فوق توانمند دارای ظرفیت مقاومت بیشتر و عملکرد بهتری نسبت به بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه دور دارد. در جدول (۷) سطوح شدت در میانه خسارت به تفکیک سطوح عملکردی مختلف تحت اثر زلزله حوزه دور تعیین شده است. بررسی و ارزیابی این جدول نشان می‌دهد نیروهای جانبی وارد شده به پایه‌ها با ارتفاع ۸ متر به‌واسطه افزایش دوره تناوب کلی سازه نسبت به پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر کاهش‌یافته است بر همین اصل و به علت جزئیات میلگردگذاری مضاعف، ظرفیت مقاومت نهایی پایه پل نسبت به پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر افزایش‌یافته است به طوری که طبق جدول (۷) سطح عملکردی فروریزش در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند و بتن معمولی به ترتیب در شتاب‌های ۲/۷۳g و ۲/۳۹g رخ داده است لازم به ذکر است که استفاده از بتن فوق توانمند در پایه‌ها با ارتفاع ۸ متری بهبود ۱۴/۲۳ درصدی نسبت به پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی داشته که این میزان طبق

جدول (۵) برای پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر ۷/۱۴ درصد بوده است که نشان از برتری پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند با ارتفاع ۸ متر تحت اثر حوزه دور دارد. همچنین میانه خسارت در سطوح عملکردی بدون آسیب و خسارت کم بر اساس جدول (۷) به ترتیب ۲۶/۸۳ درصد و ۲۴ درصد بهبود یافته است و نشان می‌دهد استفاده از بتن فوق توانمند تأثیر فراوانی در جلوگیری از ورود سازه به ناحیه غیر خطی داشته و به شکل مطلوبی از گسترش خرابی و ترک در پایه‌ها پیشگیری می‌کند.



شکل ۱۵ منحنی شکنندگی پایه ساخته شده از: (الف) بتن فوق توانمند و (ب) بتن معمولی با ارتفاع ۸ متر تحت اثر زلزله حوزه دور



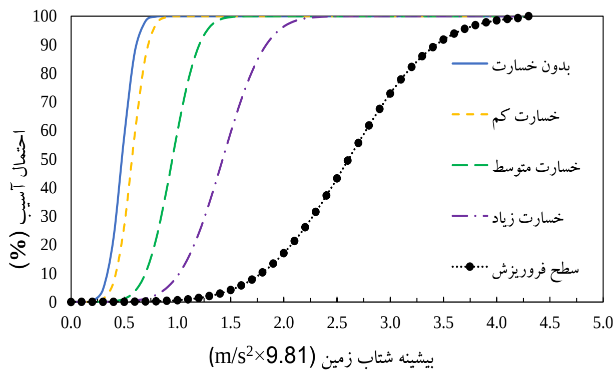
شکل ۱۶ مقایسه منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی با ارتفاع ۸ متر تحت اثر حوزه دور

جدول ۷ نتایج سطوح تحریک در نقطه میانی آسیب (مدل با ارتفاع پایه ۸ متر تحت اثر شتاب‌نگاشت حوزه دور)

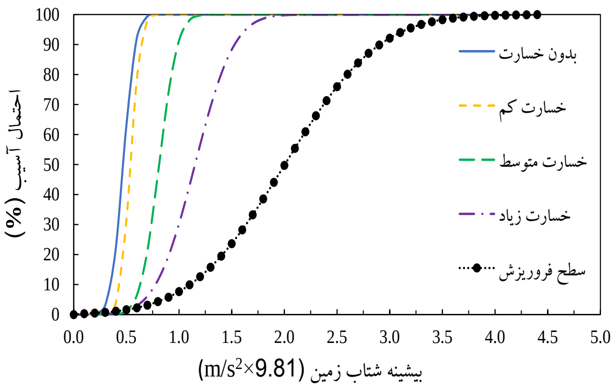
	بدون خسارت	خسارت کم	خسارت متوسط	خسارت زیاد	فروریزش
بتن فوق توانمند	۰/۵۲g	۰/۶۲g	۱/۰۱g	۱/۵g	۲/۷۳g
بتن معمولی	۰/۴۱g	۰/۵g	۰/۸۵g	۱/۲۹g	۲/۳۹g
درصد برتری بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی	۲۶/۸۳	۲۴	۱۸/۸۲	۱۶/۲۸	۱۴/۲۳

گروه ۴

در نهایت، گروه ۴ تأثیر رویدادهای لرزه‌ای میدان نزدیک بر پل‌ها با پایه‌های ۸ متری را بررسی می‌کند، در شکل (۱۷- الف) منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و در شکل (۱۷- ب) پایه‌هایی ساخته شده از بتن معمولی نشان داده شده است. این ارقام عملکرد ساختاری پل‌ها را در شرایط لرزه‌ای میدان نزدیک، زمانی که پایه‌هایی با ارتفاع ۸ متر ساخته می‌شوند بیان می‌کند و امکان مقایسه و تجزیه تحلیل را فراهم می‌سازد.



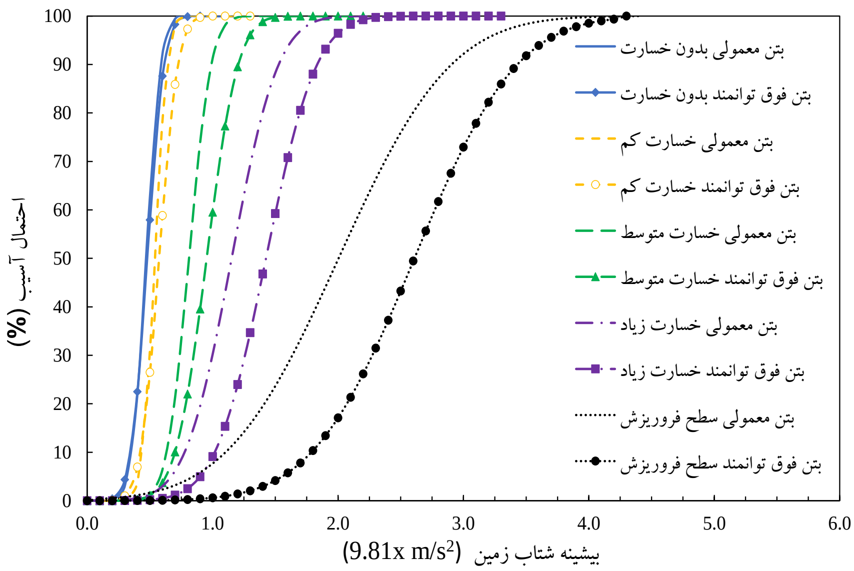
(الف)



(ب)

شکل ۱۷ منحنی شکنندگی پایه ساخته شده از: (الف) بتن فوق توانمند و (ب) بتن معمولی با ارتفاع ۸ متر تحت اثر زلزله حوزه نزدیک

نتایج مقایسه و بررسی منحنی شکنندگی پایه پل‌های ساخته شده با بتن معمولی و بتن فوق توانمند با ارتفاع ۸ متر (شکل ۱۷) تحت اثر زلزله حوزه نزدیک در شکل (۱۸) تحت عنوان ۵ حالت آسیب، بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش آمده است. نتایج به دست آمده بر اساس ۵ سطح عملکردی، بدون آسیب، خسارت کم، متوسط، زیاد، فروریزش برای نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند به ترتیب دارای انحراف معیار ۰/۱۰۴، ۰/۱۱۷، ۰/۱۹۷، ۰/۰،۶۶۰/۳۱۸ و میانگین ۰/۴۷، ۰/۵۷، ۰/۹۵، ۱/۴۲، ۲/۶۰ است و در مقابل نمونه‌های ساخته شده با بتن معمولی دارای انحراف معیار ۰/۰۷۷، ۰/۰۷۸، ۰/۱۴۴، ۰/۲۸۵، ۰/۶۵۷ و میانگین ۰/۴۴، ۰/۵۱، ۰/۸۰، ۱/۱۶، ۲/۰۶ می‌باشد که بیانگر افزایش ظرفیت مقاومت نمونه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند و ایجاد شکل‌پذیری مناسب و سخت‌شوندگی‌های پی‌درپی نسبت به نمونه‌های ساخته شده با بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک است. در جدول (۸) سطوح شدت در میانه خسارت به تفکیک سطوح عملکردی مختلف تحت اثر زلزله حوزه نزدیک تعیین شده است. بررسی و ارزیابی این جدول نشان می‌دهد نیروهای جانبی وارد شده به پایه‌ها با ارتفاع ۸ متری به واسطه افزایش دوره تناوب کلی سازه نسبت به پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر کاهش‌یافته است به همین دلیل و به علت جزئیات میلگرد گذاری مضاعف، ظرفیت مقاومت نهایی پایه پل نسبت به پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر افزایش‌یافته است به‌طوری که طبق جدول (۸) سطح عملکردی فروریزش در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند و بتن معمولی به ترتیب در شتاب‌های ۲/۶۱g و ۲/۰۷g رخ داده است لازم به ذکر است که استفاده از بتن فوق توانمند در پایه‌ها با ارتفاع ۸ متری بهبود ۲۶/۰۹ درصدی نسبت به پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی داشته که این میزان طبق جدول (۶) برای پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر ۱۷/۷۳ درصد بوده است که نشان از برتری پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند با ارتفاع ۸ متر تحت اثر زلزله حوزه نزدیک دارد. همچنین میانه خسارت در سطوح عملکردی بدون آسیب و خسارت کم بر اساس جدول (۸) به ترتیب ۹/۰۹ درصد و ۱۱/۵۴ درصد بهبود یافته است و نشان می‌دهد استفاده از بتن فوق توانمند تأثیر فراوانی در جلوگیری از ورود سازه به ناحیه غیر خطی داشته و به شکل مطلوبی از گسترش خرابی و ترک در پایه‌ها پیشگیری می‌کند. لازم به ذکر است بر اساس نتایج به دست آمده از جدول‌های (۷) و (۸) بتن فوق توانمند در کنترل عرض ترک و بهبود رفتار غیر خطی تحت اثر زلزله‌های حوزه دور عملکرد بهتری نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک از خود نشان داده است این در حالی است که عملکرد بتن فوق توانمند در افزایش ظرفیت نهایی و بهبود رفتار در سطوح آسیب متوسط، زیاد و فروریزش تحت اثر زلزله حوزه نزدیک بهبود بیشتری نسبت به زلزله‌های حوزه دور داشته است.



شکل ۱۸ مقایسه منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی با ارتفاع ۸ متر تحت اثر حوزه نزدیک

جدول ۸ نتایج سطوح تحریک در نقطه میانی آسیب (مدل با ارتفاع پایه ۸ متر تحت اثر شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک)

	بدون خسارت	خسارت کم	خسارت متوسط	خسارت زیاد	فروریزش
بتن فوق توانمند	۰/۴۸g	۰/۵۸g	۰/۹۵g	۱/۴۳g	۲/۶۱g
بتن معمولی	۰/۴۴g	۰/۵۲g	۰/۸g	۱/۱۶g	۲/۰۷g
درصد برتری بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی	۹/۰۹	۱۱/۵۴	۱۸/۷۵	۲۳/۲۸	۲۶/۰۹

نتیجه‌گیری

پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های ساخته شده به دست بشر هستند که نقش‌های حیاتی در تأمین نیازهای جامعه بشری دارند این سازه‌ها در مقایسه با ساختمان‌ها و دیگر سازه‌ها از درجه نامعینی کمتری برخوردارند و به همین دلیل بررسی و ارزیابی آن‌ها در برابر حوادث طبیعی مانند زلزله نسبت به بقیه سازه‌ها از حساسیت و اهمیت بیشتری برخوردار است در این راستا و به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای پل‌ها، نمونه‌هایی از پل با سیستم تیر دال بتنی با پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند (UHPC) و بتن معمولی (C25) در نرم‌افزار CSI-Bridge مدل‌سازی شد و با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزاینده تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک منحنی‌های شکنندگی این نمونه‌ها ترسیم گردید و با ارزیابی و تحلیل منحنی‌های شکنندگی نتایج مهمی مشاهده شد که به شرح زیر است :

۱. احتمال فراگذشت آسیب در پل‌ها با پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند نسبت به پل‌ها با پایه‌های ساخته شده از بتن معمولی در تمامی شاخص‌های آسیب کمتر است.

۲. بتن فوق توانمند به واسطه ساختار یکپارچه و مشخصات مکانیکی فوق‌العاده‌ای که دارد مقاومت فشاری بسیار بالایی را فراهم می‌آورد که با ترکیب الیاف و استفاده از میلگرد های عرضی مناسب، علاوه بر افزایش مقاومت در ناحیه خطی، با ایجاد سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت در ناحیه غیر خطی ظرفیت نهایی سازه را نیز افزایش می‌دهد.

۳. بتن فوق توانمند ظرفیت مقاومت سازه جهت جلوگیری از وقوع آسیب اولیه و وقوع آسیب کم بهبود بخشیده و با مقاومت فشاری و مقاومت کششی بیشتری که در مقایسه با بتن معمولی دارد عملکرد بسیار مطلوبی در کنترل عرض ترک داشته به طوری که ظرفیت سازه در میانه خسارت در سطح عملکردی بدون خسارت و خسارت کم در کمترین حالت به ترتیب ۹/۰۹ درصد و ۱۱/۵۴ درصد و در بهترین شرایط ۲۶/۱۹ درصد و ۲۶/۵۳ درصد بهبودیافته است. لازم به ذکر است میانه آسیب در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند

با ارتفاع ۵ متر در سطح عملکردی بدون آسیب در حالی به وقوع پیوست که در نمونه مشابه با بتن معمولی سطح خسارت کم رخ داده بود.

۴. میزان بهبود بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی در سطح آسیب زیاد و فروریزش تحت اثر زلزله حوزه دور در نمونه با پایه‌های دارای ارتفاع ۵ متر به ترتیب ۱۱/۵ درصد و ۷/۱۴ درصد است و در حوزه نزدیک این برتری به میزان ۲۰/۳۵ درصد و ۱۷/۷۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین این مقدار بهبود برای بتن فوق توانمند در پایه‌ها با ارتفاع ۸ متر تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور به ترتیب ۱۶/۲۸ درصد و ۱۴/۲۳ درصد است این در حالی است که این مقادیر برای پایه‌ها با ارتفاع ۸ متر تحت اثر زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۲۳/۲۸ درصد و ۲۶/۰۹ درصد افزایش می‌یابد که نشان دهنده عملکرد بهتر بتن فوق توانمند در زلزله‌های حوزه نزدیک است.

۵. بتن فوق توانمند در افزایش پایداری سازه تأثیر به‌سزایی داشته به طوری که در سطح نهایی آسیب حداقل ۷/۱۴ درصد و حداکثر ۲۶/۰۹ درصد بهبود نسبت به بتن معمولی کسب کرده است که این بهبود رفتار در پایداری سازه تحت سطوح سنگین‌تری از لرزش زمین بیانگر پتانسیل بالای اجزای ساخته شده با این بتن نسبت به بتن معمولی است که این امکان را برای طراحان فراهم می‌سازد تا از بتن فوق توانمند به جهت کاهش ابعاد مقاطع، طراحی‌های بهینه و معماری‌های زیباتر بهره گیرند.

سپاسگزاری

مراجع

[1] A. Caner, A.M Yanmaz, A. Yakut, O. Avsar, T. Yilmaz, “Service Life Assessment of Existing Highway Bridges with No Planned Regular Inspections,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 22 ,pp. 108–114, (2008). doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:2(108)

[2] C. Huang, J. Song, N. Zhang, G. C. Lee, M. Asce, “Seismic Performance of Precast Prestressed Concrete Bridge Girders Using Field-Cast Ultrahigh-Performance Concrete Connections,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 24, no. 6, (2019). doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943

[3]M. Zhou, W. Lu, J. Song, G. C. Lee, “Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering,” *Construction and Building Materials,* vol. 186, pp. 1256–1267, (2018). doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036

[4] M. A. Bajaber, I. Y. Hakeem, “UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 10, pp. 1058–1074, (2021). doi:10.1016/j.jmrt.2020.12.051

[5] A. K. Akhnoukh, C. Buckhalter, “Ultra-high-performance concrete : Constituents, mechanical properties, applications, and current challenges,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, (2021). doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559

[6] M. Tazarv, M. S. Saiid, “UHPC-filled duct connections for accelerated bridge construction of RC columns in high seismic zones,” *Engineering Structures*, vol. 99, pp. 413–422, (2015). doi:10.1016/j.engstruct.2015.05.018

[7] Z. Haber, B.J. F. Munoz, I. De la Varga, B. A. Graybeal,“Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing,” *Construction and Building Materials*, vol. 190, pp. 1056–1068, (2018). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.167

[8] Y. Zhang, Y. Zhu, M. Yeseta, D. Meng, X. Shao, Q. Dang, G. Chen, “Flexural behaviors and capacity prediction on damaged reinforcement concrete (RC) bridge deck strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC) layer,”

Construction and Building Materials, vol. 215, pp. 347–359, (2019). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.229

[9] M. Ye, M., Z. Guo, C. Chen, Y. Chen, "Shaking table test study on seismic performance of UHPC rectangular hollow bridge pier," *Composite Structures*, vol. 275, pp. 114435, (2021). doi:10.1016/j.compstruct.2021.114435

[10] X. Zhang, Y. Lu, X. Wu, P. Wang, R. Li, Y. Liu, C. Shen, H. Zhang, D. Zhang, "Constitutive model for ultra-high performance concrete (UHPC) considering the size effect under cyclic compressive loading," *Construction and Building Materials,* vol. 368, p. 130499, (2023). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130499

[11]S. S. Zhang, J. J. Wang, G. Lin, T. Yu, T., D. Fernando, "Stress-strain models for ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under triaxial compression," *Construction and Building Materials* vol. 370, p. 130658, (2023). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130658

[12] M. Gholhaki, A. Soleymani, O. Rezay far, "Determining Coefficient Behavior of Reinforced Moment Frame Having the Steel Plate Shear Wall using incremental Non-linear Dynamic Analysis," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 13-30, (2019) .doi:10.22067/civil.v32i4. 62958. (In Persian).

[13] T. Abbasi, B. Navayi Neya , L. Kalani sarokolayi, "Effect of Far and Near Fault Erathquake on Non-niform Excitation of Concrete Gravity Dams," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 61-82, (2019). doi:10.22067/civil.v32i2.66860. (In Persian).

[14] L Kalani sarokolayi, L .Khanmohammadi, B .Navayi, "Concrete Cubic Ground Tanks with Base Seperator Under the Transitional and Rotational Components of Earthquake. " *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 35-54, (2023).doi10.22067/JFCEI.2023.80361.1206 (In Persian)

[15] P. Esmaeiltabar, H. Khosravi, J. Vaseghi, "A Simplified Model for Dual Wall-Frame System," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 31-44, (2022). doi:10.22067/Jfcei.2022.74215.1102. (In Persian)

[16] M. Shinozuka, M. Q.Feng, H. K. Kim, S. H. Kim, "Nonlinear Static Procedure for Fragility Curve Development," *Journal of Engineering Mechanics,* vol. 126, no. 12, (2000). doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1287)

[17] R. V. Whitman, E. H. Vanmarcke, F. Asce, M. Asce, R. L. de Neufville, J. E. Brennan,.I, C. A. Cornell, J. M. Biggs, A. Asce, "Seismic design decision analysis," *Journal of the Structural Division*, vol. 101no. 5, pp. 1067-1084, (1975). doi.org/10.1061/JSDEAG.0004049

[18] M. Shinozuka, "Development of bridge fragility curves. Proceedings of the US-Italian Workshop on Seismic Evaluation and Retrofit, Multidisciplinary Center on Earthquake Engineering Research, pp. 93-99, (1998).

[19] M. Abbasi, B. Zakeri, G. G. Amiri, "Probabilistic Seismic Assessment of Multiframe Concrete Box-Girder Bridges with Unequal-Height Piers," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, p. 04015016, (2015). doi:10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000753

[20] A. Aviram, K. R, Mackie, C. Florida, "Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California," *Pacific Earthquake Engineering Research Center,* (2008). https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/web_peer803_ady_aviram_kevin_r._mackie_bozidar_stojadinovic.pdf

[21] J. B Mander, M. J. N. Priestley, R. Park, "Theorical Strss-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, (1988). doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

[22] Kaviani.Peyman, Zareian. Farzin, Taciroglu. Ertugrul, “Performance-Based Seismic Assessment of Skewed Bridges,” Technical Report, PEER, (2014) . dx.doi.org/10.13140/2.1.1586.0007

[23] X. Liang, K. M. Mosalam, “Performance-Based Robust Nonlinear Seismic Analysis with Application to Reinforced Concrete Highway Bridge Systems,” *Pacific Earthquake Engineering Research Center,* (2016). dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20197.09440

[24] ASCE/SEI. “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings”, *American Society of Civil Engineers*, no. 41-17, (2017)

[25] Islamic Republic of Iran Management and Plannig Organization .Standard Loads for Bridges. no 139. (In Persian)

[26] Islamic Republic of Iran Management and Plannig Organization Road and Railway Bridges Seismic Resistant Design code, No 463 (In Persian)

[27] The Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision .The Code of Practice for the analysis and Design of Concrete Bridges.No 389 (In Persian)

[28] “AASHTO LRFD Bridge Design Specifications,” *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, (2008)

[29] Roudgari, S. Aziminezhad, A. Seyed Razaghi, M. Emami,f. (2019). “Seismic Fragility Curves of Multi-Span Highway Bridges Considering Multiple Damage Parameters”. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) (In Persian)

[30] J. Pereiro-Barceló, J. L. Bonet; B. Martínez-Jaén, B. Cabañero-Escudero, “Design Recommendations for Columns Made of Ultra-High-Performance Concrete and NiTi SMA Bars,” *Buildings*, vol. 13, p. 991, (2023). doi.org/10.3390/buildings13040991

[31] N. Naeimi, M. A. Moustafa, “Analytical Stress–Strain model for steel spirals-confined UHPC,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 5, p. 100130, (2021). doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100130

[32] Z. B. Haber, A. Foden, M. McDonagh, J. Ocel, K. Zmetra, B. Graybeal, “Design and Construction of UHPC-Based Bridge Preservation and Repair Solutions,” *Federal Highway Administration*, (Washington, DC: 2022) doi.org/10.21949/1521867.

[33] J. Dai, D. Wang, X-Y.Chen, R. Zhang, Z-G. Sun, “Assessment of an optimal intensity measure for isolated bridges based on the geometric mean of the response spectrum” (2022).
DOI:10.21203/rs.3.rs-2177127/v1

[34] FEMA, 2009, Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P-695, prepared by Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

[35] R. Akbari, “Seismic fragility analysis of reinforced concrete continuous span bridges with irregular configuration,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 8, no. 9, pp. 873–889, (2012). doi:10.1080/15732471003653017

[36] Azarbonyad, F. Definition, explanation and how to draw fragility curves. 2020. Books (In Persian)

[37] HAZUS, 1997. “Earthquake loss estimation methodology,”Technical Manual. Washington, DC: National Institute of Building for the Federal Emergency Management Agency.